



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

중합 후 자료에서 단일 트레이스 역산을 활용한 속도정보 도출기법 개발

Development of Seismic Velocity Estimation Technique
using Single Trace Inversion in Post-Stack Data



지도교수 정 우 근

2018년 8월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과
이 다 운

본 논문을 최상현의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 신 성 렬 (인)

위 원 장 원 일 (인)

위 원 정 우 근 (인)



2018년 8월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract (국문)	v
Abstract (English)	vii
1. 서 론	1
2. 이 론	4
2.1 전통적인 자료처리 알고리즘	4
2.2 제안된 속도분석 기법을 적용한 자료처리 알고리즘	7
2.3 가우스-뉴턴법을 이용한 시간영역 파형역산	11
2.4 음원추정 알고리즘	13
3. 수치예제	15
3.1 인공합성자료를 활용한 수치실험	15
3.2 3차원 현장자료	48
4. 결론	51
감사의 글	54
참고문헌	55

List of Tables

Table 1 Synthetic modeling parameters	15
Table 2 Synthetic modeling parameters	33



List of Figures

Fig. 1	Flow chart of conventional seismic data processing	5
Fig. 2	Semblance velocity analysis with CMP gather :	
	(a) CMP gather, (b) Semblance panel	6
Fig. 3	Flow chart of proposed seismic data processing	8
Fig. 4	Flow chart of extended and proposed seismic data processing	10
Fig. 5	True velocity model	16
Fig. 6	The fold (number of trace per CMP) versus the CMP numbers ..	16
Fig. 7	Shot Gathers	17
Fig. 8	Common Mid Point Gathers	18
Fig. 9	Smoothing velocity model	19
Fig. 10	Stack Section	20
Fig. 11	Result of Phase-Shift Migration	21
Fig. 12	Result of single trace inversion	23
Fig. 13	Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m	23
Fig. 14	Stack Section using result of single trace inversion	24
Fig. 15	Result of Phase-Shift Migration using result of single trace inversion	25
Fig. 16	Result of 2D inversion : Type1	27
Fig. 17	Result of 2D inversion : Type2	27
Fig. 18	Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m : Type1	28
Fig. 19	Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion	

at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m : Type2	29
Fig. 20 Result of RTM : Type1	31
Fig. 21 Result of RTM : Type2	31
Fig. 22 SEG/EAGE overthrust velocity model	33
Fig. 23 Shot Gathers	34
Fig. 24 Common Mid Point Gathers	35
Fig. 25 Smoothing velocity model	36
Fig. 26 Stack Section	37
Fig. 27 Result of Phase-Shift Migration	38
Fig. 28 Result of single trace inversion	40
Fig. 29 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m	40
Fig. 30 Result of Phase-Shift Migration using result of single trace inversion	41
Fig. 31 Result of 2D inversion : Type1	43
Fig. 32 Result of 2D inversion : Type2	43
Fig. 33 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m : Type1	44
Fig. 34 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m : Type2	45
Fig. 35 Result of RTM : Type1	47
Fig. 36 Result of RTM : Type2	47
Fig. 37 Stack data : Cross section	49
Fig. 38 Result of inversion (a) Cross Section and (b) Zoom in Cross Section	50

중합 후 자료에서 단일 트레이스 역산을 활용한 속도정보 도출기법 개발

이 다 운

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Division of Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

유·가스 부존지역 탐사현장에서 취득된 탄성과 자료를 활용하여 지하 저장소에 대한 구조 영상을 얻고자 할 때, 공통중심점 모음, 속도분석, 수직시간차 보정, 중합, 구조보정 등 전통적인 자료처리기법이 순서에 맞게 수행된다. 전통적인 자료처리기법은 각각의 기법이 순서대로 수행되므로 속도분석 결과에 따라 최종 결과가 많이 달라질 수 있으며, 수행자의 주관적인 판단이 수행 결과에 많은 영향을 미치는 단점을 가지고 있다. 수직시간차 보정이 원활히 수행되어 얻은 중합된 자료의 경우, 수직입사 수직반사된 신호로 가정할 수 있다. 따라서 이와 같은 자료의 경우 단일 트레이스 역산을 활용하여 속도정보를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서는 단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성정보를 이용하여 속도분석 시 필요한 RMS 속도 및 주시정보를 도출하였으며, 이를 전통적인 자료처리기법에 적용하였다. 해당 과정을 통해 기존 자료처리기법의 문제점인 속도분석과정을 단일 트레이스 역산으로 대체하여 수행자의 주관적 판단이 들어갈 수 있는 단점을 자동화 공정으로 바꿀 수 있었다.

보다 정밀한 지하구조 정보를 도출하기 위해서는 중합 전 자료를 활용한 완전파형역산, 역시간 구조보정 등과 같은 기법들이 사용된다. 이와 같은 기법

들은 심도에 따른 속도정보를 초기정보로 제공해야하며, 초기정보는 수행결과에 많은 영향을 미치고 있다. 본 연구에서 제시한 기법을 통해 획득될 수 있는 속도정보는 시간에 대한 속도정보가 아닌 공간에 대한 속도정보이므로 이와 같은 기법들의 초기정보로 활용되어 실제구조와 유사한 지하구조 정보를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. Marmousi-2 모델과 SEG/EAGE 충상단층 모델을 수정하여 생성한 인공합성자료와 동해에서 취득된 현장자료를 활용하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

주요어: 중합 후 자료; 속도분석; 물성; 단일 트레이스 역산



Development of Seismic Velocity Estimation Technique using Single Trace Inversion in Post-Stack Data

Lee, Da Woon

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Division of Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In the field of oil and gas reservoir area exploration, conventional seismic data processing such as CMP sorting, velocity analysis, NMO correction, stack, and migration is performed in regular sequence to obtain structural images of subsurface reservoirs. The conventional seismic data processing have the disadvantage that analyst's subjective judgment influence on the processing result. In the case of the stacked data obtained by performing the NMO correction well, it can be assumed signal of vertically incident and reflected. Therefore, it can estimate velocity information using single trace inversion for such this stacked data. In this paper, the RMS velocity and travelttime for velocity analysis are estimated using result of single trace inversion, and applied to the conventional seismic data processing. The new result of velocity analysis is improved by using single trace inversion to overcome the disadvantage of the existing method, and the effect on subjective judgment is replaced by the fully automated process.

To estimate more accurate structure information, techniques such as

full waveform inversion and reverse time migration using pre stack data are used. These techniques require velocity information according to the depth as initial information, and initial information influence on the result. The velocity information obtained through the proposed method is information on the space, and if it is used as the initial information, the structure image similar to actual structure can be estimated. The validity of the proposed algorithm was verified by using the synthetic data generated by modifying the Marmousi-2 model, the SEG/EAGE overthrust model, and the field data obtained from the East Sea.

KEY WORDS: Post-stack data 중합 후 자료; Velocity analysis 속도분석; Physical properties 물성; Single trace inversion 단일 트레이스 역산



제 1 장 서 론

일반적으로 탄성과 탐사자료를 이용하여 지하구조의 영상을 취득할 때 수행하는 방법은 중합 전 자료를 이용하는 방법과 중합 후 자료를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다(Sheriff & Geldart, 1995). 중합 전 자료를 이용할 경우 파형역산 및 역시간 구조보정 등을 이용하여 심도에 대한 비교적 정확하고 복잡한 지층구조를 파악할 수 있지만, 많은 시간과 비용이 요구된다(Pratt et al. 1998). 중합 후 자료를 이용할 경우 간단한 자료의 분류와 자료처리 과정을 통해 최종 지층구조 영상을 취득할 수 있다(Yilmaz et al. 2000). 중합 후 자료를 이용하여 얻어진 최종 지층구조 영상은 중합 전 자료를 이용한 기법에 비교하여 정확성이 부족하고, 복잡한 지층구조를 파악하기에는 어려움이 있다. 하지만 탐사자료를 취득 후 빠르게 지층 구조영상을 취득할 수 있으며, 중합 과정에서 무작위 잡음, 다중반사파에 대한 영향이 감소하고 비용이 저렴하다는 장점이 있다.

중합 후 자료의 경우 탐사자료를 공통중간점을 공유하는 자료들로 분류하고, 이를 속도분석을 통해 반사 이벤트에 대한 RMS(Root-Mean square) 속도와 주시 정보를 이용하여 수직시간차 보정을 수행한 다음 수직시간차 보정이 적용된 자료를 중합하여 얻는다. 중합 후 자료는 구조보정 기법이 적용되어 공통중간점-시간에 대한 지하 지층 구조영상을 취득할 수 있다. 공통중간점 모음자료를 이용한 속도분석의 경우 분석자의 주관적인 판단이 요구되기 때문에 분석자마다 다른 결과를 나타낼 수 있다(Saleh et al. 2016). 이는 얻어진 지층 구조영상의 신뢰도에 대한 문제로도 직결되며, 분석자의 숙달된 경험과 능력에 따라 더욱 신뢰성 있는 지층 단면도를 취득할 수 있다. 따라서 속도분석을 수행할 시 분석자의 주관적 판단 여부를 최소화하기 위한 연구가 필요하다.

속도분석의 주관적 판단 여부를 최소화하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며(Shin & Cha, 2008, 2009; Min & Shin, 2006; Choi et al. 2005; Pyun et al. 2007; Kim et al. 2009; Chung et al. 2010; Bae et al. 2010), 그중 중합 전 자료를 이용한 탄성과 파형역산기법이 가장 활발히 연구가 진행되고 있다. 파형역산기법은 관측된 탄성과 자료와 수치모델링을 통해 얻은 자료간의 잔차인 목적

합수를 반복적인 계산을 통해 최소화 하는 방법으로 지하물성을 결정하고 지층의 구조를 영상화하는 자료처리기법이다. 파형역산기법은 지층의 단면도를 얻기까지 완전자동화공정으로 이루어져 있으며, 분석자의 개입을 최소한으로 줄여 숙달된 경험과 능력 없이도 큰 신뢰도를 가질 수 있다.

파형역산기법은 많은 계산량을 요구하는 알고리즘으로, 초기에는 이용하는데 많은 어려움이 있었지만, Lailly (1983)와 Tarantola (1984)가 제시한 구조보정에 사용되는 역전과 기법을 바탕으로 효율적인 계산이 가능하여 탄성과 파형역산에 대한 연구가 많이 수행되어 발전해왔다. Kolb et al. (1986)과 Gauthier et al. (1986)은 역전과 기법을 기반으로 음향 매질에서 역산을 수행하였으며, Mora (1987)은 탄성매질로 역산을 확장하여 적용하였다. Pratt et al. (1998)은 시간 영역에서 수행되던 역산을 주파수 영역으로 수행하였으며, Choi et al. (2008)은 주파수 영역에서 음향-탄성 결합 매질에 대한 역산기법을 제시하였다. 탄성과 파형역산을 통해 얻은 지하물성자료는 지층의 물성자료와 지층의 구조를 이해하는 데 많이 사용되어 왔지만, 역시간 구조보정에서의 속도모델로서도 사용되어 보다 정확한 지층의 경계 및 구조를 파악하는 데 이용되기도 한다.

하지만 최근까지 연구되고 있는 탄성과 파형역산기법의 경우 중합 전 자료를 많이 이용하고 있으며, 중합 전 자료를 이용한 탄성과 파형역산의 경우 역전과 기법과 유사-헤시안 기법과 같은 효율적인 계산방법이 개발되었음에도 여전히 다중채널 탐사와 같은 대규모 탐사를 통해 취득된 자료를 이용한 역산을 수행하기에는 대용량의 컴퓨터 메모리와 계산시간이 필요로 한다. 특히, 3차원 자료를 이용한 역산을 수행하기에는 대용량의 컴퓨터 메모리를 요구하기 때문에 가우스-뉴턴법과 같은 기법을 적용하기에는 한계가 있다(Ji & Choi, 2010).

탄성과 자료처리 과정에서의 수직시간차 보정은 분석자의 속도분석을 통해 얻은 RMS 속도와 주시 정보를 이용하여 공통중간점에 따른 자료를 영-벌림(zero-offset) 거리에서의 자료로 만드는 작업이다. 수직시간차 보정을 통해 영-벌림거리로 만들어진 자료를 공통중간점에 따라 중합하여 얻어진 자료의 경우 해당 중간점을 대표하는 단일 트레이스 자료로 판단할 수 있다. 기존 선행연구 중 최연진 등(2014)은 이와 같은 중합 후 자료를 이용하여 1차원 단일 트레이

스 역산을 수행하였으며, 기존 중합 후 자료를 이용한 역산 알고리즘에 비해 보다 정확한 결과를 얻었음을 확인하였지만, 송·수신기간의 벌림거리에 따른 산란의 영향으로 신뢰성에 한계를 가지는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 중합 후 자료를 이용한 단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 정보를 1차원 속도모델로서 가정하여 RMS 속도와 주시정보를 얻었으며 이는 분석자의 주관적 판단을 최소화하고 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 분석자의 주관적 판단이 개입되는 Semblance 속도분석을 통해 얻은 중합 후 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였으며, 역산 결과로서 취득된 물성 정보를 이용하여 공통중간점에 대한 RMS 속도와 주시 정보를 구하였다. 구해진 RMS 속도와 주시 정보를 수직시간차 보정에 적용함으로써 주관적 판단을 최소화시킨 중합 후 자료를 구하였으며, 이를 이용한다면 신뢰성이 향상된 지층구조 영상을 취득할 수 있을 것으로 사료된다. 단일 트레이스 역산을 통해 얻은 물성 정보는 중합 전 자료를 이용한 다중채널 역산에 초기 속도모델로서 적용되어 초기속도모델에 대해 민감한 특성을 가지는 다중채널 파형역산에서 보다 정확한 물성 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 이를 통해 중합 전 구조보정을 수행하여 지하 지층경계구조에 대한 정확한 영상을 취득할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 중합 전 자료를 이용한 결과를 분석하기 위해 중합 전 구조보정 중 위상-이동 구조보정을 이용하였으며(Gazdag, 1978), 중합 후 자료를 이용한 단일 트레이스 역산은 엇격자 유한차분법과 가우스-뉴턴법을 이용하며, 역산에 필요한 음원의 경우 디콘볼루션을 이용한 기법을 통해 음원을 추정하여 사용하였다(Kim et al., 2013). 그리고, 중합 후 자료를 통해 생성된 물성 정보를 이용하여 유사-헤시안 및 역전파 기법을 이용한 파형역산 및 역시간 구조보정을 수행하였다. 개발된 기법은 적용성을 판단하기 위해 수정된 Marmousi-2 모델(Martin, G et al., 2006)과 SEG/EAGE 충상단층 모델(Aminzadeh et al., 1997) 이 이용하였으며, 3차원 현장자료에 직접 해당 기법을 적용해 보았다.

제 2 장 이 론

2.1 전통적인 자료처리 알고리즘

반사법 탐사에서 취득되는 자료를 통해 구조보정을 수행하여 실제 지하지층의 단면과 탄성과 단면을 유사하게 만들기 위해서는 자료처리 과정이 필요하다. Fig. 1은 반사법탐사자료를 이용하여 수행되는 전통적인 자료처리기법의 순서도를 나타내며, 제시된 순서도는 전통적인 자료처리기법에서 단순화시킨 순서도이다(Yilmaz, 1987). 구조보정을 수행하여 탄성과 단면을 취득하기 위해서는 먼저 자료를 취득하고, 파동이 전파되어 거리에 따라 반사된 신호가 약해지는 형상을 이득을 주어 후반 신호의 세기를 보상해준다. 탐사자료의 경우 해상에서의 잡음, 탐사 장비에서나 발생하는 잡음, 탐사 선박 잡음 등 다양한 잡음이 수신기에 기록된다. 이러한 잡음을 제거하기 위해 주파수분석을 통해 필터 작업이 수행된다. 잡음이 제거된 자료는 GPS 정보를 이용하여 송·수신기 위치와 별립거리에 따른 공통중간점 모음을 수행한다. 공통중간점에 따라 모인 자료를 이용하여 수직시간차 보정을 수행하기 위해서는 영별립거리에 대한 RMS 속도와 주시 정보가 필요하며, 이를 얻기 위해서 속도분석이 수행된다. 속도분석의 경우 Fig. 2 와 같은 Semblance 속도분석을 통해 Semblance 단면도에서 강하게 나타나는 영역을 분석자가 직접 피킹하여 RMS 속도와 주시 정보를 얻는다. Semblance 속도분석을 통해 정확한 RMS 속도와 주시 정보를 얻기 위해서는 분석자의 자료처리 경험과 지식이 요구되며, 분석자에 따라 다른 속도정보를 얻을 수 있다. 속도분석을 통해 얻은 RMS 속도와 주시 정보를 이용하여 공통중간점 모음자료의 별립거리에 따른 반사신호의 지연을 영별립거리에 대한 신호로 보상하는 수직시간차 보정을 수행한다. 다음으로, 중합과정을 통해 공통중간점에 대한 단일 트레이스 자료를 얻는다. 공통중간점에 따라 얻어진 단일 트레이스 자료를 이용하여 구조보정을 수행하고 최종 탄성과 단면을 얻어 지질학적 해석에 이용한다.

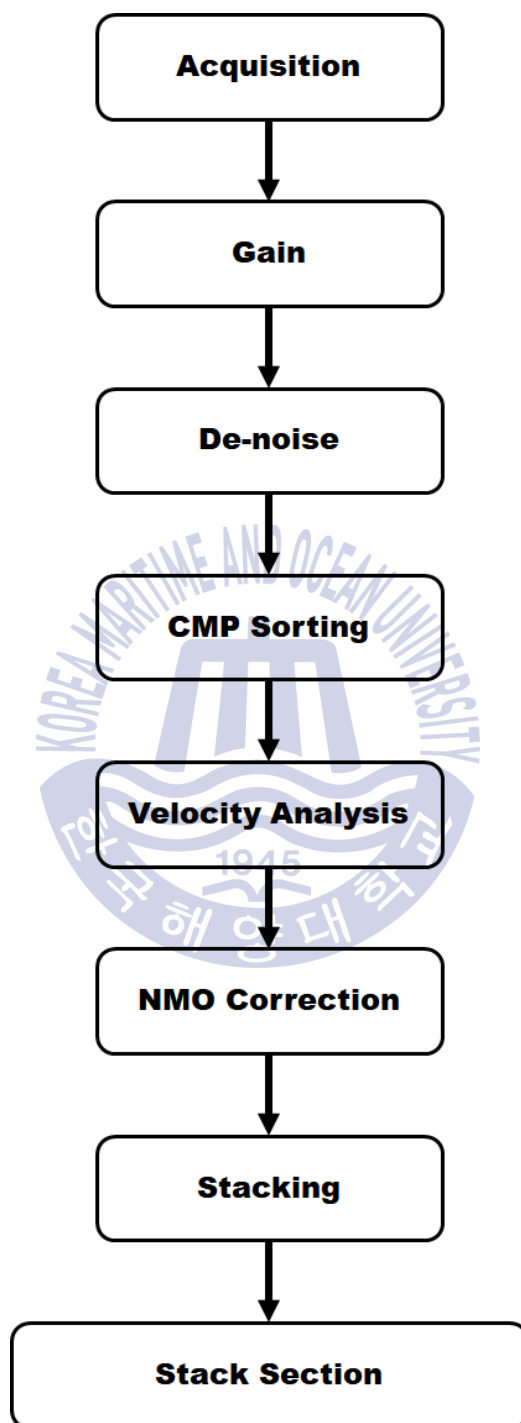


Fig. 1 Flow chart of conventional seismic data processing

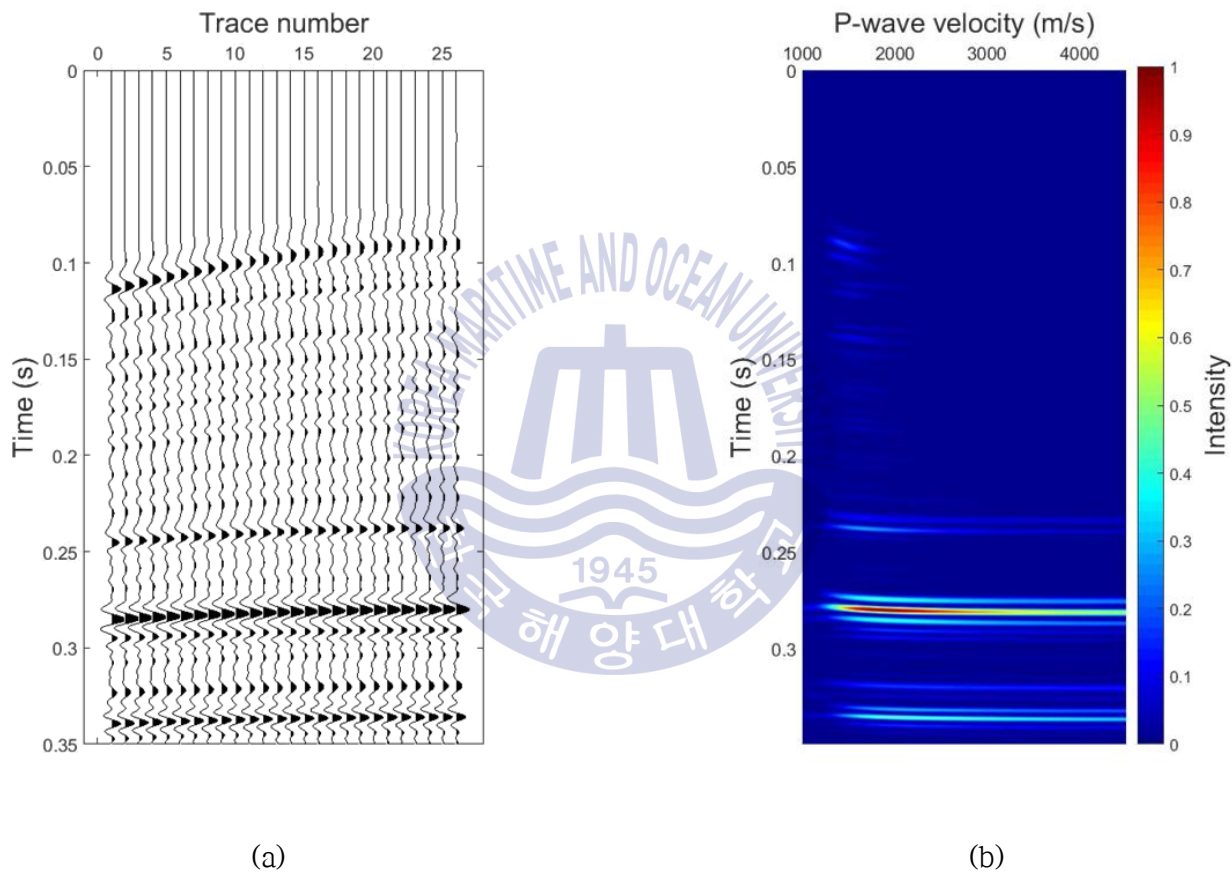


Fig. 2 Semblance velocity analysis with CMP gather : (a) CMP gather, (b) Semblance panel

2.2 제안된 속도분석 기법을 적용한 자료처리 알고리즘

본 연구에서는 전통적인 반사법 자료처리 과정에서 수직시간차 보정을 수행하기 위해 필요한 RMS 속도와 주시 정보를 얻고자 할 때, 속도분석을 수행하는 과정에서 개입되는 분석자의 주관적 판단으로 인한 영향을 최소화하기 위한 기법을 제안하였다. Fig. 3은 제안된 속도분석 기법을 적용한 자료처리 알고리즘 순서도이다. 속도분석을 통해 얻어진 중합 자료는 수직입사 및 수직반사 신호로 가정되며, 공통중간점에 대한 단일 트레이스 자료로서 생각할 수 있다. 제안된 알고리즘은 중합 후 자료인 단일 트레이스 자료를 이용하여 구조보정을 수행하기 전 분석자의 영향을 줄이고, 더욱 정확한 중합 단면도를 취득하기 위해 중간점에 따른 단일 트레이스 역산을 수행하였다. 단일 트레이스 자료를 이용한 역산을 수행하기 위해 필요한 음원정보의 경우 공통중간점 모음에서 직접 파 구간만을 이용하여 음원추정 알고리즘을 통해 얻은 음원을 이용하며, 초기 속도모델을 설정한 다음 역산을 수행한다. 단일 트레이스 자료를 이용한 역산의 경우 엇격자 유한차분법 기반의 가우스-뉴턴법을 이용한 역산을 수행하였으며, 역산을 통해 지하 심도에 따른 P파 속도를 얻고자 하였다. 역산을 수행함에 따라 오차가 수렴 값을 만족하는 경우, 만족하지 않을 경우 업데이트된 속도모델을 바탕으로 다시 역산을 수행한다. 역산결과를 통해 얻어진 심도에 따른 P파 속도를 이용하여 RMS 속도와 주시 정보를 도출하였으며, 이를 수직시간차 보정에서 필요한 정보로써 이용하였다. 단일 트레이스 역산은 관측자료와 1차원 모델링을 통해 취득된 자료간의 잔차가 최소가 되는 방향으로 목적함수를 설정하여 수행하기 때문에 분석자의 주관적 판단을 통해 얻은 관측자료를 보다 객관성 있고 신뢰성 있는 자료로 만들 수 있다.

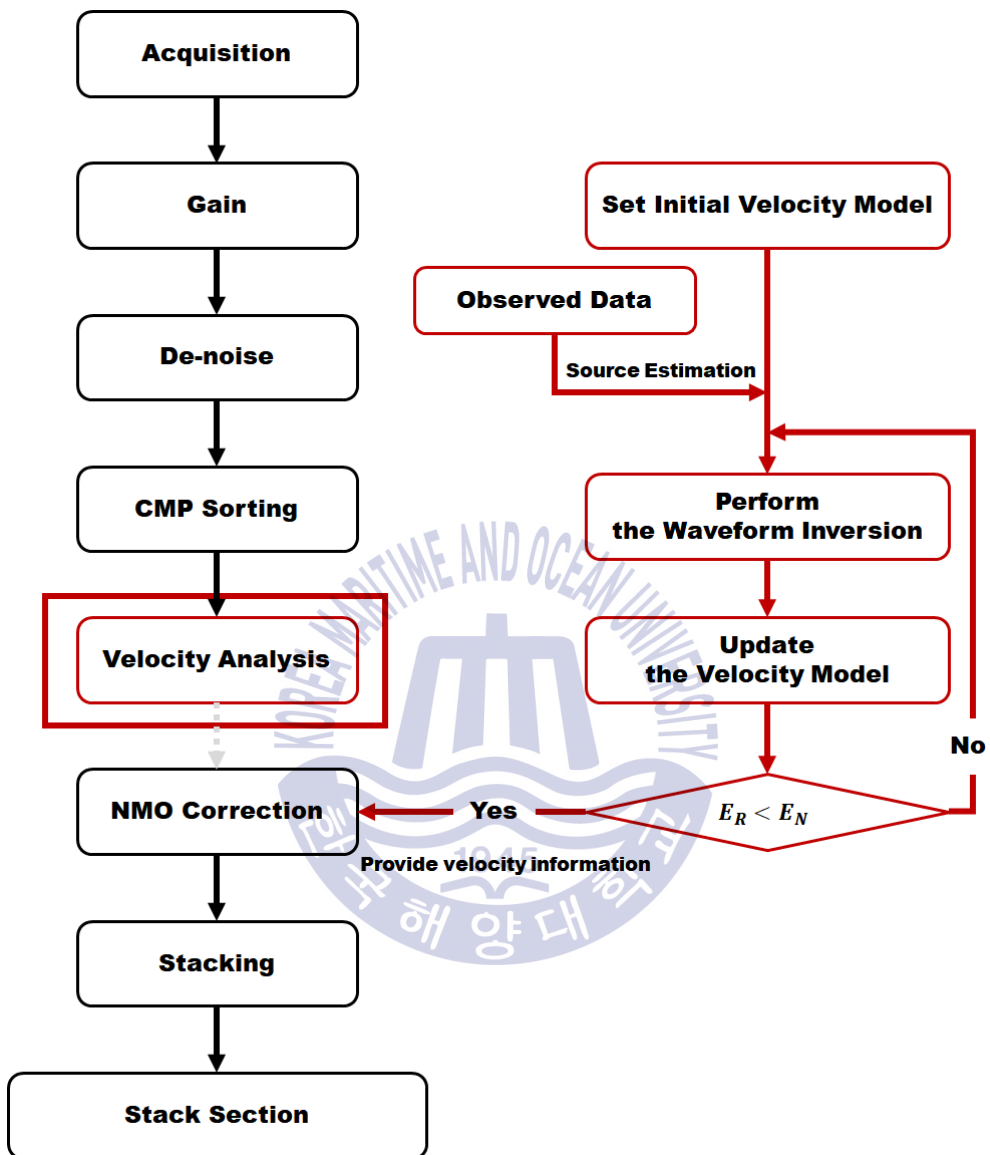


Fig. 3 Flow chart of proposed seismic data processing

단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보는 다양한 자료처리기법에 확장하여 적용할 수 있다. Fig. 4는 제안된 속도분석기법을 이용한 확장된 알고리즘 순서도이다. 중합 후 자료를 이용한 단일 트레이스 역산 결과는 공통중간점 위치의 지형 정보를 대표하는 물성을 알 수 있다. 중합 전 자료처리기법 중 하나인 파형역산의 경우 초기속도모델에서 민감한 특징을 가지며, 단일 트레이스 역산 결과를 초기속도모델로 이용하여 파형역산을 수행할 경우 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 마찬가지로 중합 전 자료를 이용하는 역시간 구조보정의 경우도 배경속도에 따라 정확성이 달라지며, 마찬가지로 단일 트레이스 역산 결과를 이용할 경우 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 중합 후 자료를 이용한 역산결과를 통해 중합 후 자료의 신뢰성을 향상시키고 역산 결과를 속도모델로서 이용하여 파형역산 및 구조보정을 통해 보다 정확한 지층 구조를 규명하였다.



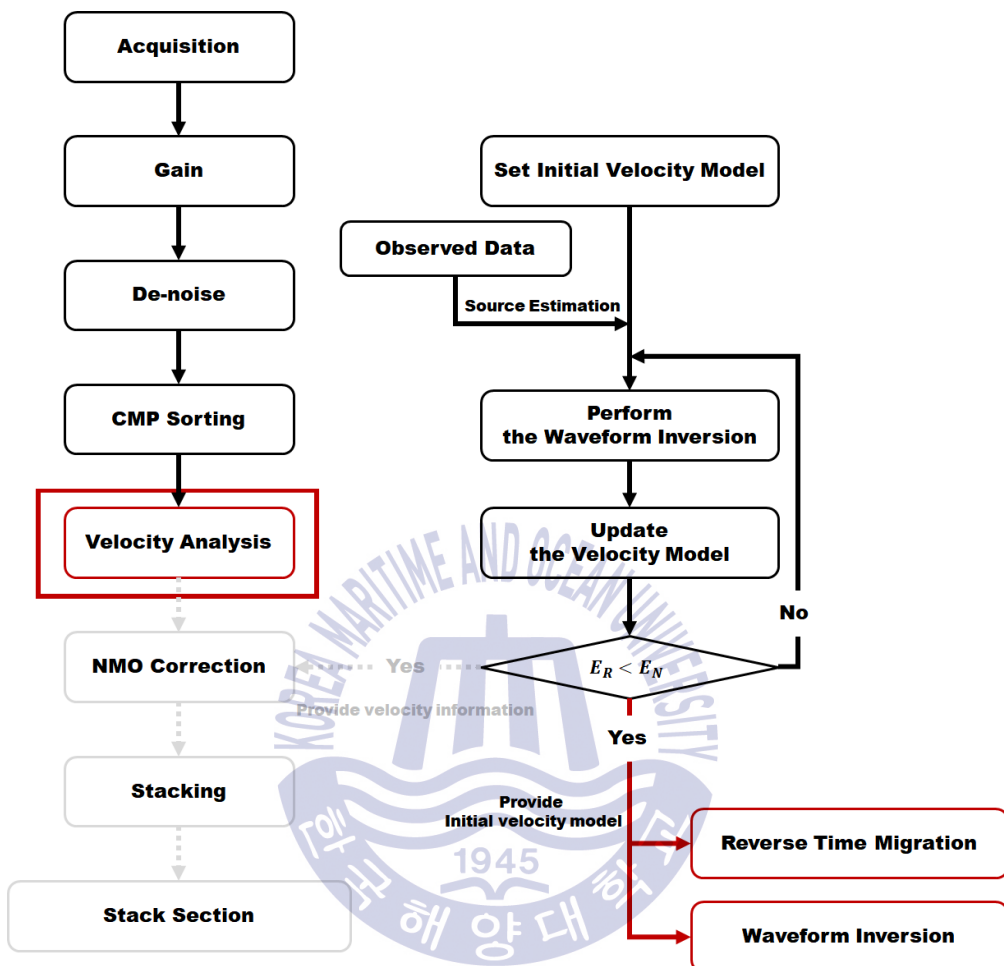


Fig. 4 Flow chart of extended and proposed seismic data processing

2.3 가우스-뉴턴법을 이용한 시간영역 파형역산

본 연구에서는 식 (1)과 같은 l_2 -norm을 이용하여 목적함수를 생성하였다.

$$E(p) = \frac{1}{2} \int_0^{T_{\max}} [u(t) - d(t)]^2 dt \quad (1)$$

여기서 E 는 목적함수를 의미하며, p 는 모델 매개변수, T_{\max} 는 총 기록 시간을 의미한다. $u(t)$ 와 $d(t)$ 는 계산데이터 및 관측된 데이터를 의미한다. 임의의 k 번째 매개변수 p 에 관하여 편미분을 수행하면 식 (2)와 같이 목적함수의 경사 방향을 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial E(p)}{\partial p_k} = \int_0^{T_{\max}} \frac{\partial u(t)}{\partial p_k} [u(t) - d(t)] dt \quad (2)$$

여기서 $\frac{\partial E(p)}{\partial p_k}$ 는 목적함수의 경사방향을 의미하며, $\frac{\partial u(t)}{\partial p_k}$ 는 편미분 파동장을 의미한다. 편미분 파동장인 $\frac{\partial u}{\partial p_k} = \left[\frac{\partial u}{\partial p_1} \frac{\partial u}{\partial p_2} \dots \frac{\partial u}{\partial p_k} \right]$ 는 자코비안 행렬인 J 를 이용하여 표현이 가능하다. 헤시안 행렬의 경우 모델 매개변수 p 에 대한 k 와 l 의 2차 편미분으로 구성되며 이는 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{kl} = \frac{\partial^2 E(p)}{\partial p_k \partial p_l} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial p_1} \\ \frac{\partial u}{\partial p_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial u}{\partial p_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial p_1} & \frac{\partial u}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial u}{\partial p_l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 u}{\partial p_1 \partial p_1} & \frac{\partial^2 u}{\partial p_1 \partial p_2} & \dots & \frac{\partial^2 u}{\partial p_1 \partial p_l} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial p_{12} \partial p_1} & \frac{\partial^2 u}{\partial p_{22} \partial p_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 u}{\partial p_k \partial p_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 u}{\partial p_k \partial p_l} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 두 번째 항의 경우 잔차가 작거나 방정식이 준선형일 경우 매우 작으므로 이를 생략할 수 있다. 첫 번째 항의 경우는 자코비안 행렬을 이용하

여 헤시안행렬은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$H \approx J^T J \quad (4)$$

여기서 T 는 전치(Transpose)을 의미한다. 목적함수의 경사방향과 헤시안 행렬을 이용하면 식 (5)와 같은 가우스-뉴턴식을 구할 수 있다(Tarantola, 1984).

$$p_k^{n+1} = p_k^n - (J^T J)^{-1} J^T (u - d) \quad (5)$$

만약 잔차가 크고, 비선형이면 감쇠최소자승법을 통해 해의 정확성을 향상시킬 수 있다. 감쇠최소자승법의 경우 감쇠율 λ 와 단위행렬 I 를 헤시안행렬에 사용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(Marquardt, 1963; Levenberg, 1944).

$$p_k^{n+1} = p_k^n - (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (u - d) \quad (6)$$



2.4 음원추정 알고리즘

탄성과 파형역산을 수행하기 위해 탐사에 사용된 음원파형 정보가 필요하다. 음원파형 정보를 얻기 위해서 최근 많은 연구가 진행중에 있으며, 본 연구에서는 그린함수와 음원파형간의 상호상관으로서 추정하고자 한다. 음원 추정을 위해서 관측자료의 송·수신기의 정확한 위치정보와 음원이 전파되는 배경속도가 필요하다. 본 연구에서는 해상에서 취득된 직접파를 이용하여 음원을 추정하였기 때문에 배경속도를 $1,500m/s$ 로 설정하였다. 관측자료는 식 (7)과 같이 음원파형과 그린함수의 콘볼루션으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} d(x_{source}, x_{receiver}, t) &= G(x_{source}, x_{receiver}, t) * f(t) \\ &= \sum_{\tau} G(x_{source}, x_{receiver}, \tau) * f(t - \tau) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, x_{source} 와 $x_{receiver}$ 는 송·수신기의 위치를 의미하며, $d(x_{source}, x_{receiver}, t)$ 는 해당 송·수신기 위치에서 취득된 관측자료, τ 는 시간 상수, $G(x_{source}, x_{receiver}, t)$ 는 그린함수를 의미하고, $f(t)$ 는 음원파형을 의미한다. 음원파형인 $f(t)$ 가 비용함수가 최소가 되는 Wiener 필터 계수를 가진다면, 이는 최소자승법을 통해 디콘볼루션이 가능해진다. 이때 최소자승법의 오차(L)은 식 (8)와 같이 정의된다.

$$L = \sum_{\tau} \left(d(x_{source}, x_{receiver}, t) - \sum_{\tau} G(x_{source}, x_{receiver}, \tau) * f(t - \tau) \right)^2 \quad (8)$$

여기서, 오차 L 을 최소화하기 위해 음원 $f(t)$ 가 모든 시간에서 0이되는 값을 편미분을 취하면 식 (9)와 식 (10)로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial s_i} &= -2 \sum_{\tau} d(x_{source}, x_{receiver}, t) g(x_{source}, x_{receiver}, \tau) \\ &\quad + 2 \sum_i \left(\sum_{\tau} f(\tau) g(x_{source}, x_{receiver}, t - \tau) \right) g(x_{source}, x_{receiver}, t - i) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
&= -2 \sum_{\tau} d(x_{source}, x_{receiver}, t) g(x_{source}, x_{receiver}, \tau) \\
&\quad + 2 \sum_i \left(\sum_{\tau} f(\tau) g(x_{source}, x_{receiver}, t - \tau) \right) g(x_{source}, x_{receiver}, t - i) = 0
\end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)에서의 1항은 관측자료와 그린함수의 상호상관이며, 2항은 그린함수의 자기상관과 음원파형의 곱셈이다. 식 (10)을 행렬 구성으로 표현하면 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-2} & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-3} & r_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ r_{n-2} & r_{n-3} & r_{n-4} & \cdots & r_0 & r_1 \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n-2} \\ f_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{n-2} \\ h_{n-1} \end{pmatrix} \tag{11}$$

여기서 r_i 는 자기상관의 시간 지연을 의미하며, h_i 는 그린함수와 관측자료 사이의 상호상관 시간 지연을 의미한다. 식 (11)의 자기상관 행렬은 대각선 상의 모든 요소들의 값이 같은 Toeplitz 행렬이기 때문에 Levinson-recursive를 통해 관측자료의 음원 $f(t)$ 를 구할 수 있다.

제 3 장 수치예제

3.1 인공합성자료를 활용한 수치실험

3.1.1 수정된 Marmousi-2 모델을 이용한 제안 기법 검증

본 연구에서는 수치 예제를 통해 인공합성자료를 취득하였다. 자료처리 알고리즘 검증을 위해 많이 사용되는 속도모델 중 대표적인 Marmousi-2 모델을 목적에 따라 수정하여 사용하였다(Fig. 5). 속도모델의 경우 음향모델을 가정하여 P파 속도만 존재하며, S파 속도는 0 km/s , 밀도는 전체모델에서 1 g/cm^3 으로 설정하였다. 수정된 속도모델을 이용한 수치모델링을 통해 해당 지층 모델에 대한 인공합성자료를 취득하였다. 사용된 모델의 크기는 소규모 탐사를 가정하여 $1000\text{ m} \times 169\text{ m}$ 으로 설정하였으며, 해수층의 깊이는 51 m 이다. 수치모델링 수행 시 사용된 변수는 Table 1과 같다. 음원의 경우 1차 미분 가우스 함수를 이용하였다. 모델링 수행 시 경계에 의해 나타나는 반사파를 제거하기 위해 CPML 경계조건을 적용하였다.

Table 1 Synthetic modeling parameters

parameters	value
number of x-axis grids	1000
number of z-axis grids	169
number of samples	3000
grid spacing (m)	1
sampling interval (s)	0.0001
cutoff frequency (Hz)	250
number of shot	301
interval of shot (m)	2
number of receiver according to shot	51
interval of receiver (m)	2

자료처리 분석을 위해 생성된 인공합성 자료의 송·수신기의 공통중간점에 따른 중첩 수를 분석 하였다(Fig. 6). 공통중간점의 번호의 경우 모델의 거리에 따른 직관적인 비교를 위해 속도모델에서의 반사 위치 점을 공통중간점 번호로서 정하였다. 분석 결과 최대 26개의 신호가 중첩되면 이 중 최소 중첩 수가 10개 이상인 공통중간점 자료를 이용하였다. Fig. 7은 취득된 인공합성자료의 공통송신원 모음을 나타내며, Fig. 8은 최소 중첩 수가 10개 이상인 자료를 공통중간점에 따라 분류한 자료를 나타낸다.

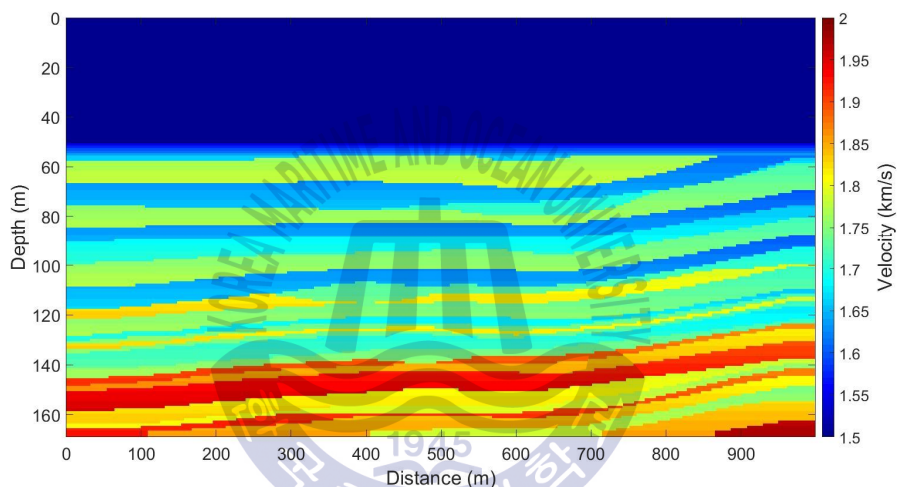


Fig. 5 True velocity model

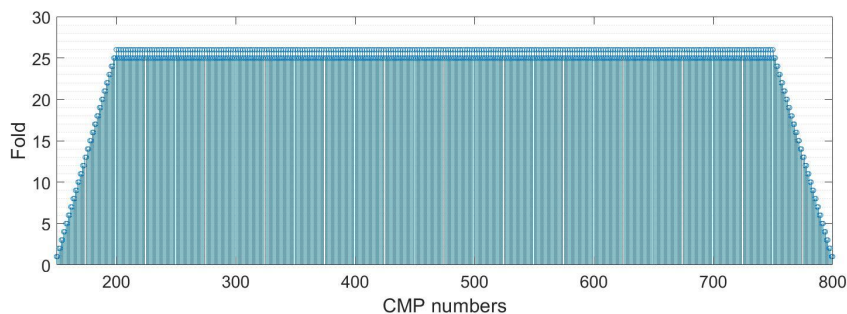


Fig. 6 The fold (number of trace per CMP) versus the CMP numbers

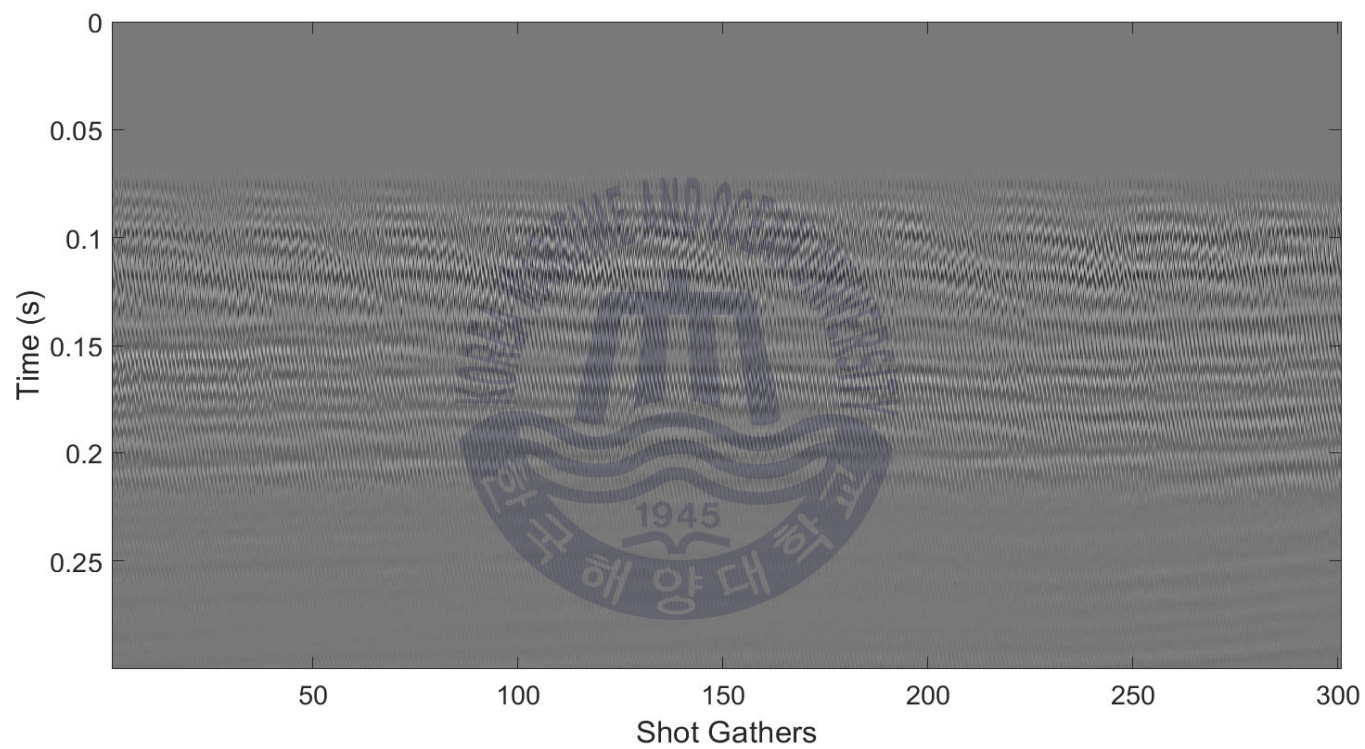


Fig. 7 Shot Gathers

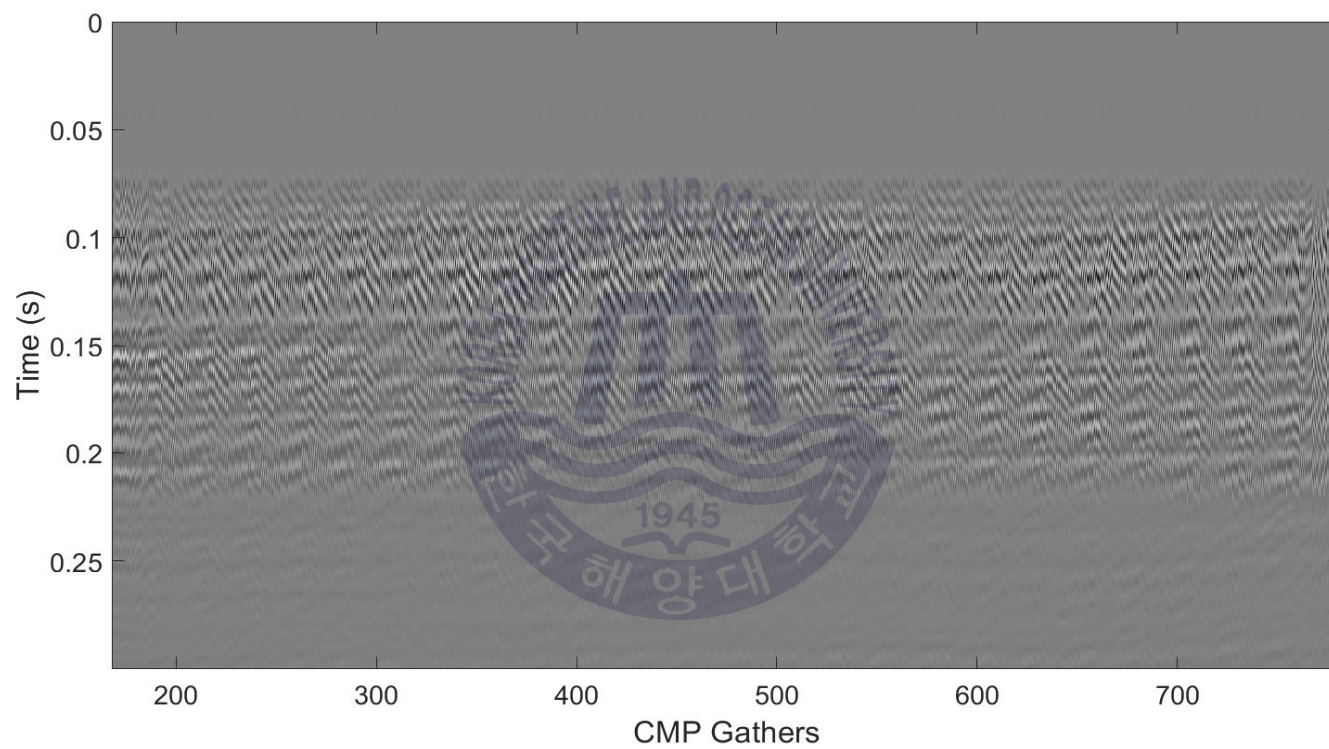


Fig. 8 Common Mid Point Gathers

공통중간점에 따라 분류된 자료를 이용하여 중합 후 자료로 변환하기 위해서는 수직시간차 보정 작업을 수행해야한다. 본 연구에서는 제안된 알고리즘의 적용성을 판단하기 위해 직접 Semblance 속도분석을 수행하지 않고, Fig. 9과 같은 속도모델을 평활화한 모델에서 RMS 속도 및 주시정보를 도출하였다. 평활화한 속도모델의 경우 지층 간의 경계가 구분이 모호해지며, 얇은 지층에 의한 반사와 부분을 구분하기가 힘들다. 속도모델로부터 계산한 RMS 정보를 이용하여 수직시간차 보정과 중합하여, Fig. 10와 같은 중합 자료를 취득하였다. 그리고 중합 자료를 이용하여 중합 전 구조보정을 수행하였으며, 중합 전 구조보정으로 위상-이동 구조보정을 적용하였다(Fig. 11).

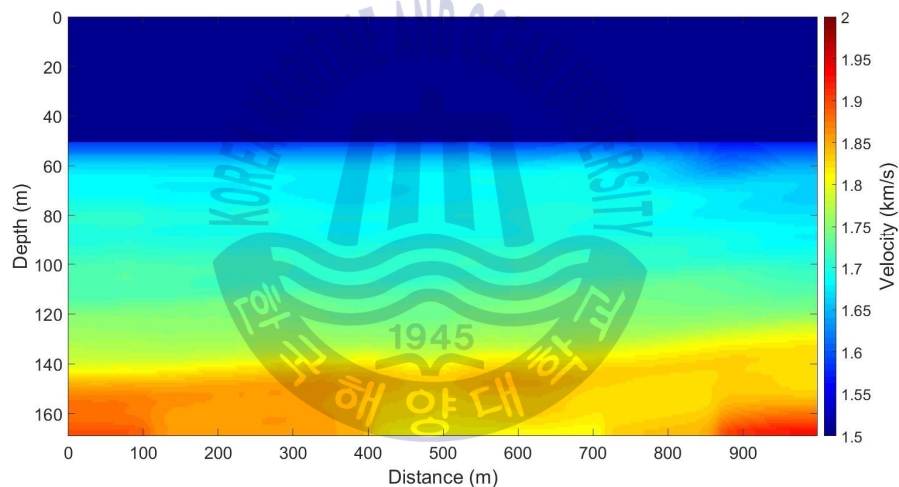


Fig. 9 Smoothing velocity model

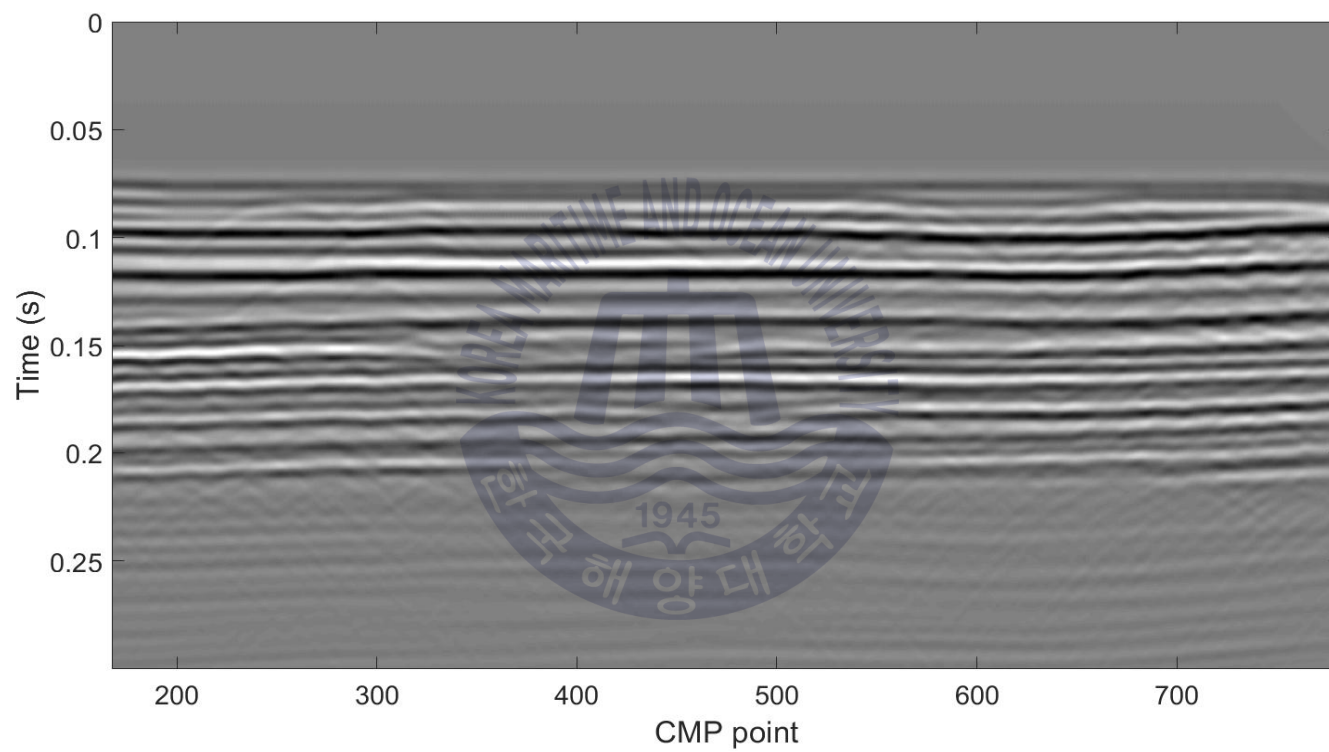


Fig. 10 Stack Section

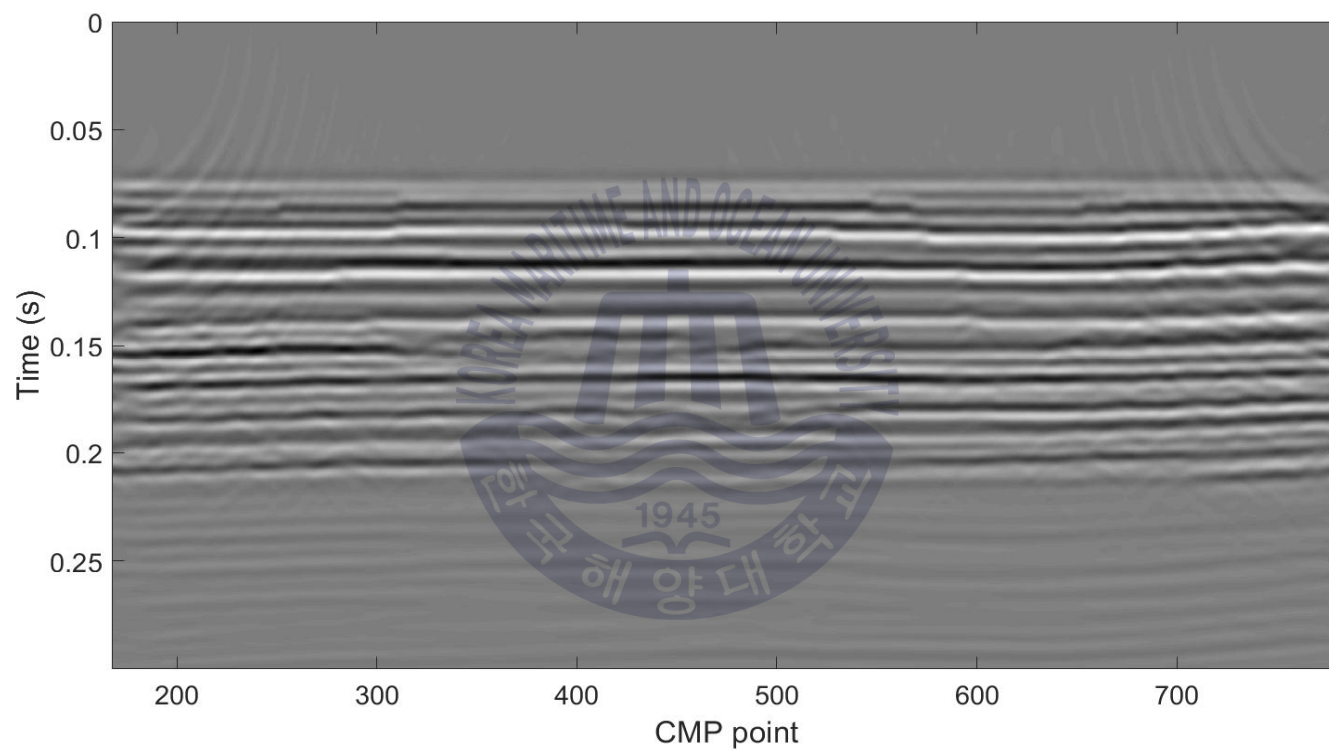


Fig. 11 Result of Phase-Shift Migration

평활화한 속도모델에서 도출된 RMS 정보를 통해 얻어진 중합 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였다. 역산 수행 시 초기속도 모델의 경우 Semblance 속도분석에서 사용하였던 평활화한 속도모델을 이용하였다. 음원의 경우 공통중간점 모음자료에서 직접파만을 이용하여 추정하였다. Fig. 12는 단일 트레이스 역산 결과를 나타내며, Fig. 13 수평 320m, 640m 지점 깊이방향에 대한 물성 정보를 나타내었다. 역산 결과에서 단일 트레이스 역산을 수행하였음에도 불구하고 지하 지층구조의 경계면이 연속성을 나타냄을 확인할 수 있으며, 전체적인 실제 속도모델의 경향을 찾아가는 것을 확인할 수 있다.

단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보에서 RMS 속도 및 주시정보를 도출 하였으며, Fig. 14와 같은 중합 자료를 취득하였다. 이전 자료와 비교 분석을 수행하기 위해 중합 자료를 이용하여 위상-이동 구조보정을 수행하였다.(Fig. 15). 평활화한 속도모델과 단일 트레이스 역산결과를 이용한 구조보정 결과를 비교해보면 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 구조보정 결과가 약간의 잔상이 제거된 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 인공합성자료에는 잡음이 존재하지 않고, 대략적인 속도 경향을 가진 모델을 이용하였기 때문에, 구조보정결과에서 큰 차이는 확인하기 어려운 것을 확인할 수 있다.

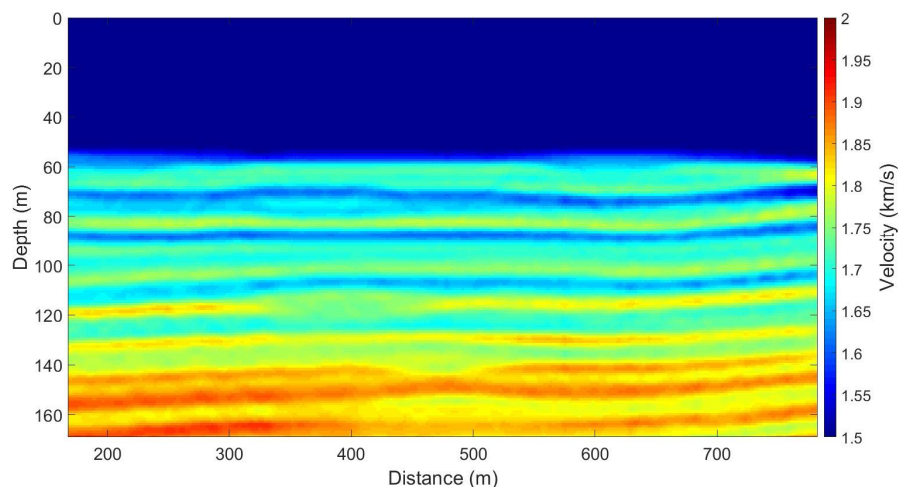


Fig. 12 Result of single trace inversion

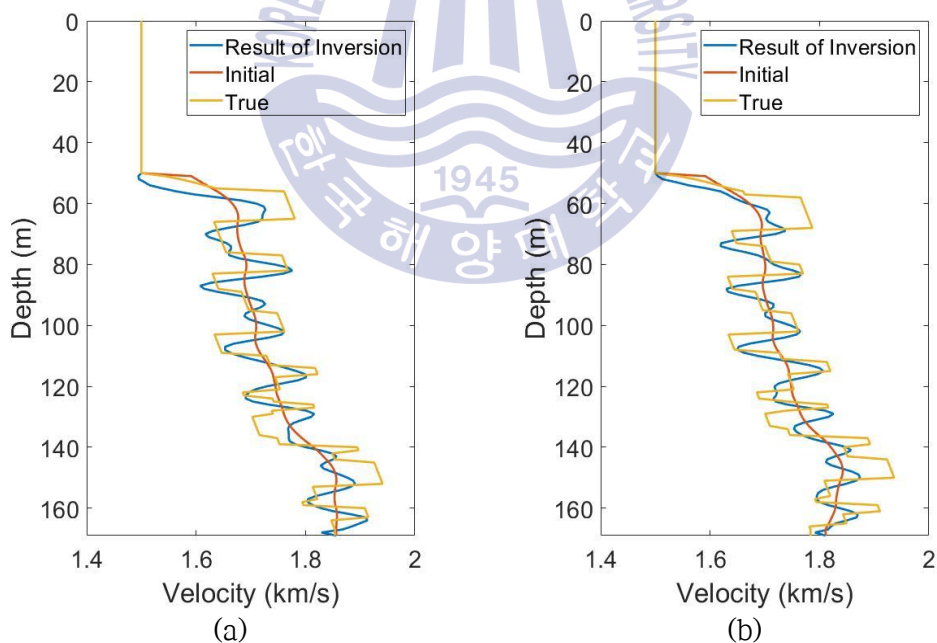


Fig. 13 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion

at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m

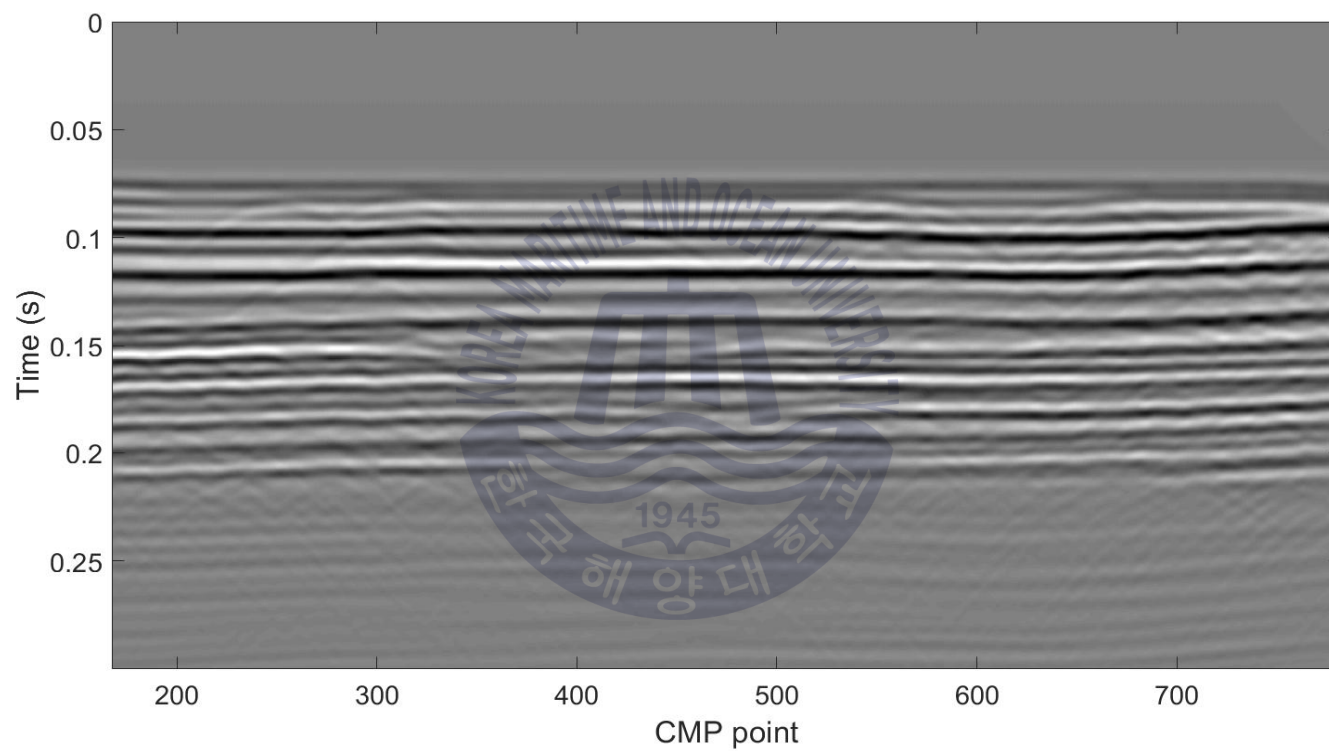


Fig. 14 Stack Section using result of single trace inversion

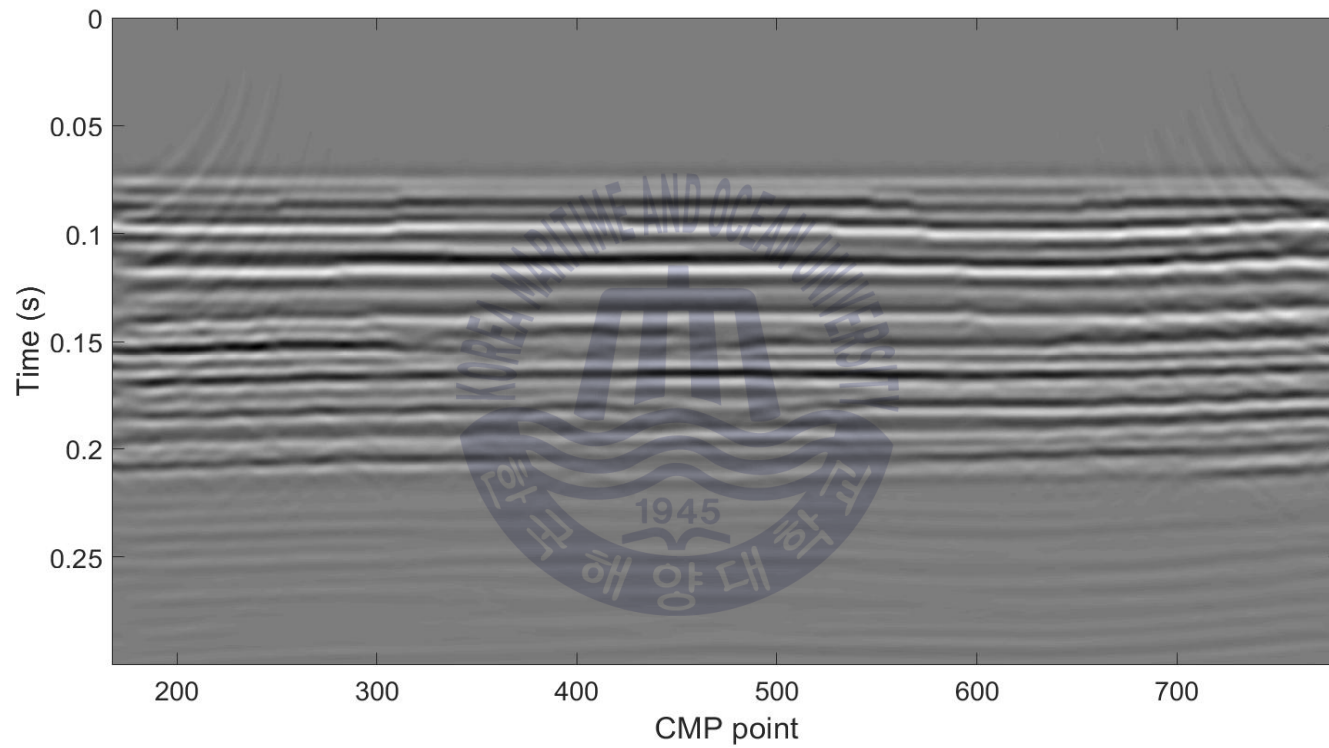
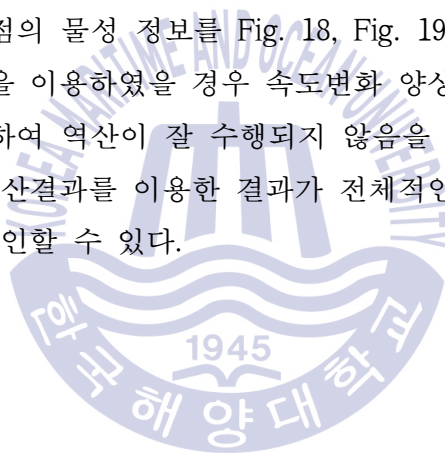


Fig. 15 Result of Phase-Shift Migration using result of single trace inversion

본 연구에서는 제안된 속도정보 도출기법을 확장하여 단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보를 2차원 파형역산에 초기속도모델로서 이용하고자 하였다. 2차원 파형역산의 경우 유사-헤시안 및 역전파 기법을 이용하였으며, 모델링 변수의 경우 Table 1과 동일하다. 해당 초기속도모델을 이용한 역산결과에 대한 비교 및 분석을 수행하기 위해 선형증가모델을 초기속도모델로서 이용하여 추가적으로 2차원 파형역산을 수행하였다. 초기속도모델을 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 유형을 Type1이라 명칭하며, 선형증가 속도모델을 이용한 경우를 Type2로 명칭 하였다. Fig. 16과 Fig. 17는 초기속도 모델로서 단일 트레이스 역산결과를 이용한 역산결과와 선형증가 속도모델을 이용한 역산결과를 나타낸다. 보다 정밀한 비교를 위하여 수평 320m 지점 깊이방향에 대한 물성 정보와 수평 640m 지점의 물성 정보를 Fig. 18, Fig. 19로 나타내었다. 역산 결과 선형증가 속도모델을 이용하였을 경우 속도변화 양상은 잘 찾아가지만 초기속도모델에 한계로 인하여 역산이 잘 수행되지 않음을 알 수 있다. 초기속도모델을 단일 트레이스 역산결과를 이용한 결과가 전체적인 실제 속도모델에 대한 경향을 잘 찾아감을 확인할 수 있다.



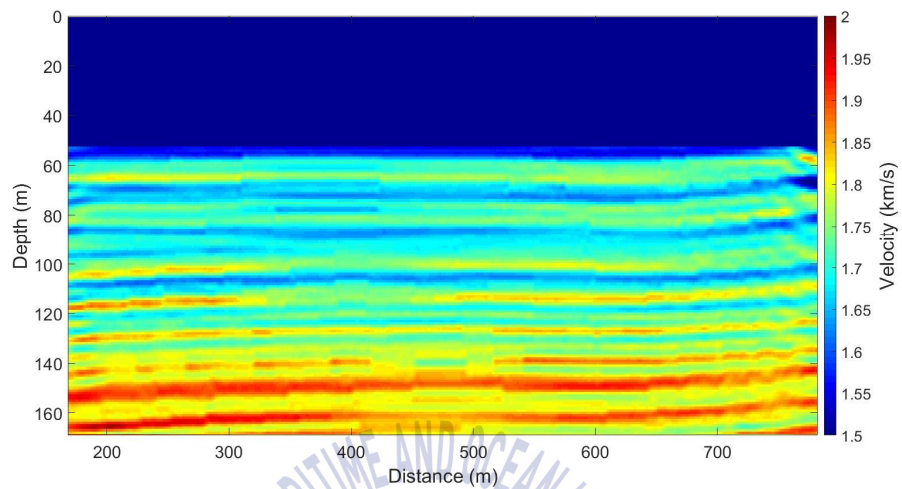


Fig. 16 Result of 2D inversion : Type1

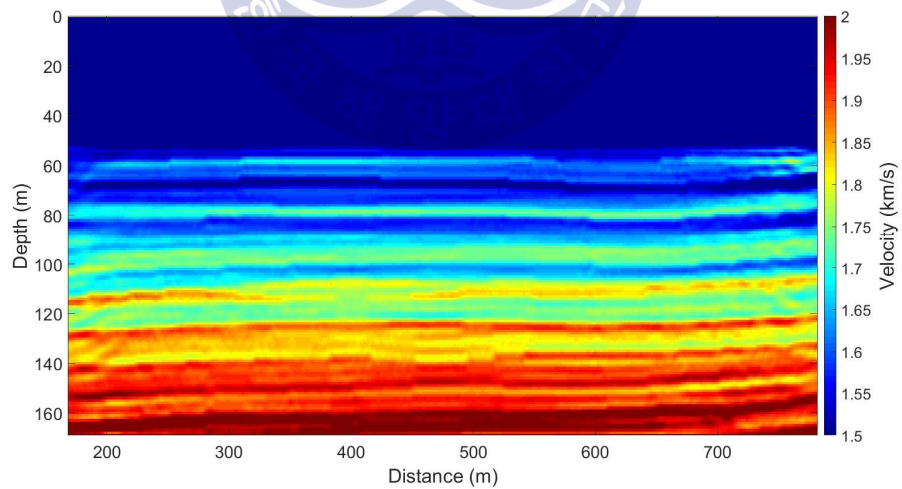


Fig. 17 Result of 2D inversion : Type2

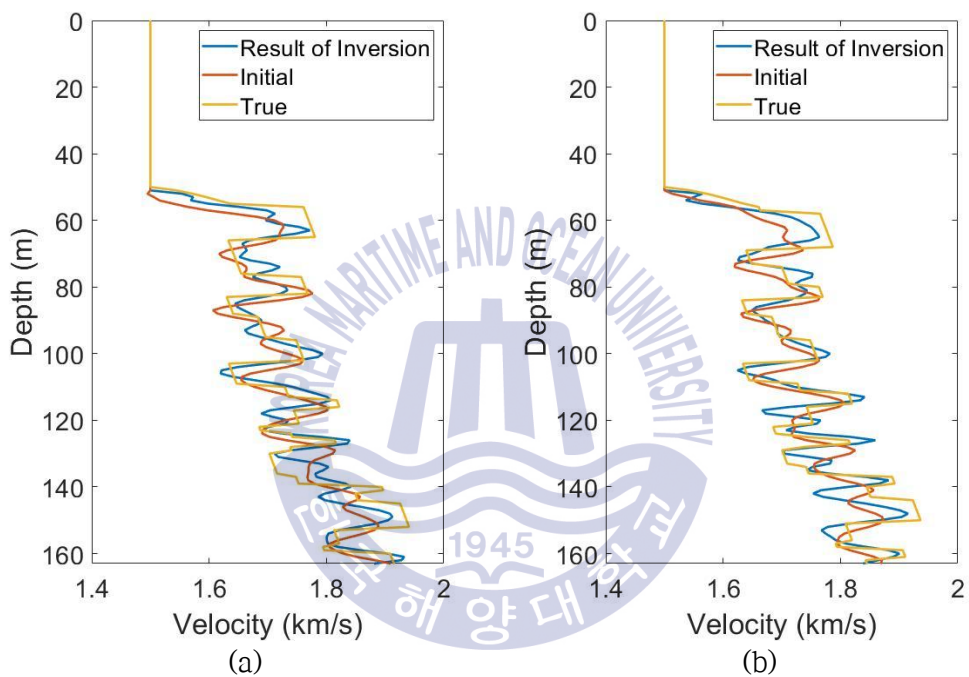


Fig. 18 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion

at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m : Type1

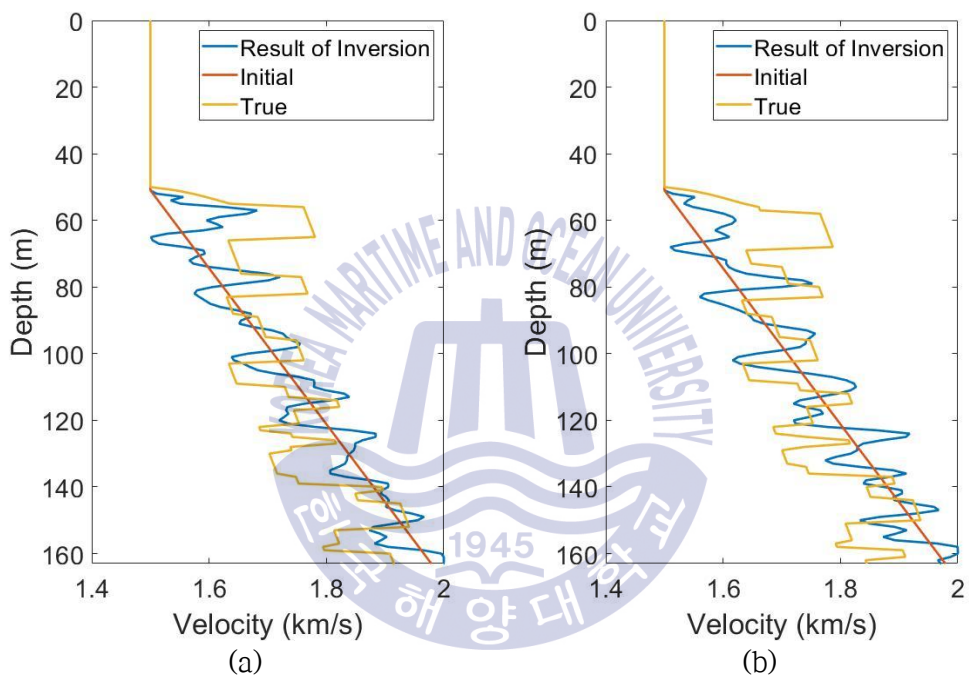


Fig. 19 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion
at a horizontal position of (a) 320m, (b) 640m : Type2

단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보를 중합 전 구조보정인 역시간 구조보정에서 필요한 배경모델로서 이용하고자 하였다. 역시간 구조보정을 수행하기 위한 모델링 변수는 2차원 파형역산에서 수행한 변수와 동일하며, 앞선 경우와 같이 속도모델을 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 경우를 Type1, 선형증가 속도모델을 이용한 경우를 Type2로 명칭하여 수행하였다. Fig. 20과 Fig. 21은 역시간 구조보정 결과를 나타낸다. 역시간 구조보정의 결과는 수직방향으로 2회의 1차 미분을 적용하여 나타내었다. 구조보정 결과를 비교해보면 선형증가모델을 이용할 경우 지층 경계에 대한 깊이가 원래 깊이에 비해 얇게 평가되어 나타는 것을 확인할 수 있다. 이것은 상부 속도모델에 대해 실제 속도모델 보다 높은 속도일 경우 나타나는 현상이며, 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 경우에는 지층의 경계가 제 위치를 찾아가는 것을 확인할 수 있다. 전체적인 구조보정 결과는 단일 트레이스 역산을 이용하여 수행한 결과와 선형증가 속도모델을 비교하였을 때 비교적 큰 차이는 확인하기 힘들다.



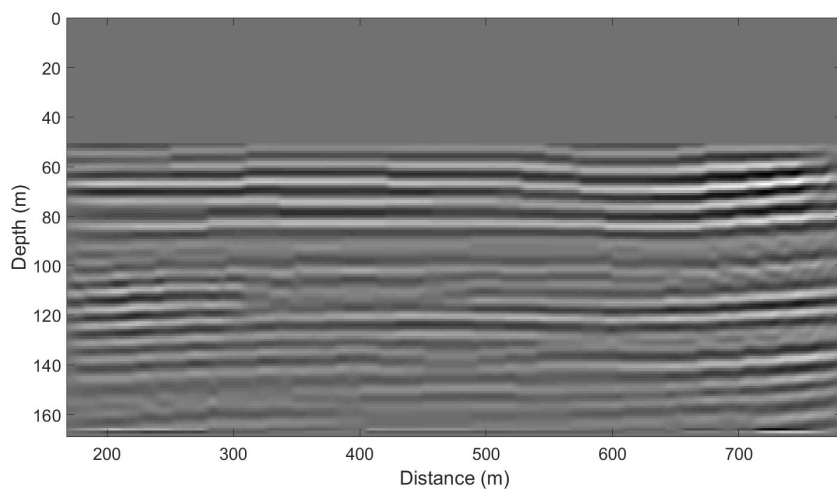


Fig. 20 Result of RTM : Type1

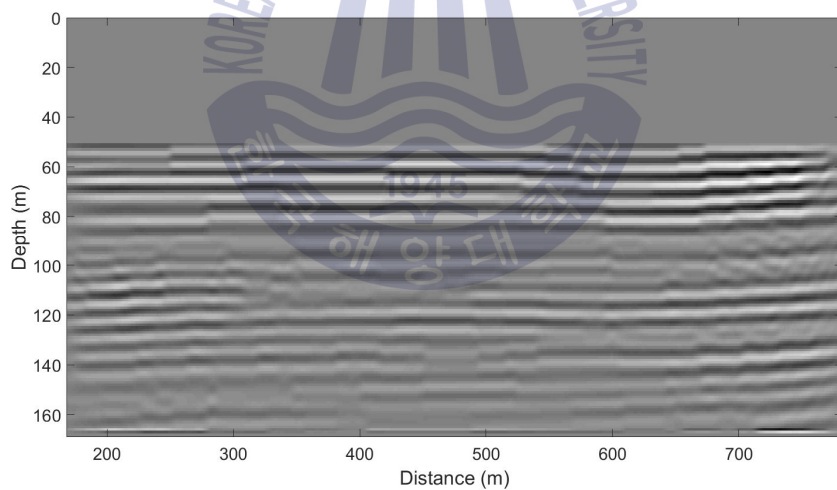


Fig. 21 Result of RTM : Type2

3.1.2 SEG/EAGE 충상단층 모델

본 연구에서 또 다른 수치예제로서 SEG/EAGE 충상단층 모델을 사용하였다. 해당 모델은 SEG (Society of Exploration Geophysists)와 유럽의 EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers)가 공동으로 제작한 모델이다. 해당 속도모델은 Fig. 22와 같이 충상단층의 형태로 이루어져있다. 속도모델의 경우 음향모델을 가정하여 P파 속도만 존재하며, S파 속도는 0 km/s , 밀도는 전체모델에서 1 g/cm^3 으로 설정하였다. 해당 모델을 이용하여 수치모델링을 통해 해당 지층 모델에 대한 인공합성자료를 취득하였다. 사용된 모델의 크기는 소규모 탐사를 가정하여 $1001\text{ m} \times 193\text{ m}$ 으로 설정하였으며, 해수층의 깊이는 31 m 이다. 수치모델링 수행에 사용된 변수는 Table 2과 같다. 음원은 1차 미분 가우스 함수를 이용하였다. 모델링 수행 시 경계에 의해 나타나는 반사파를 제거하기 위해 CPML 경계조건을 적용하였다.

자료처리 분석 결과 최대 26개의 신호가 중첩되며 이중 최소 중첩 수가 10개 이상인 공통중간점 자료를 이용하였다. Fig. 23은 취득된 인공합성자료의 공통송신원 모음을 나타내며, Fig. 24는 최소 중첩 수가 10개 이상인 자료를 공통중간점에 따라 분류한 자료이다.

Table 2 Synthetic modeling parameters

parameters	value
number of x-axis grids	1001
number of z-axis grids	193
number of samples	3000
grid spacing (m)	1
sampling interval (s)	0.0001
cutoff frequency (Hz)	250
number of shot	301
interval of shot (m)	2
number of receiver according to shot	51
interval of receiver (m)	2

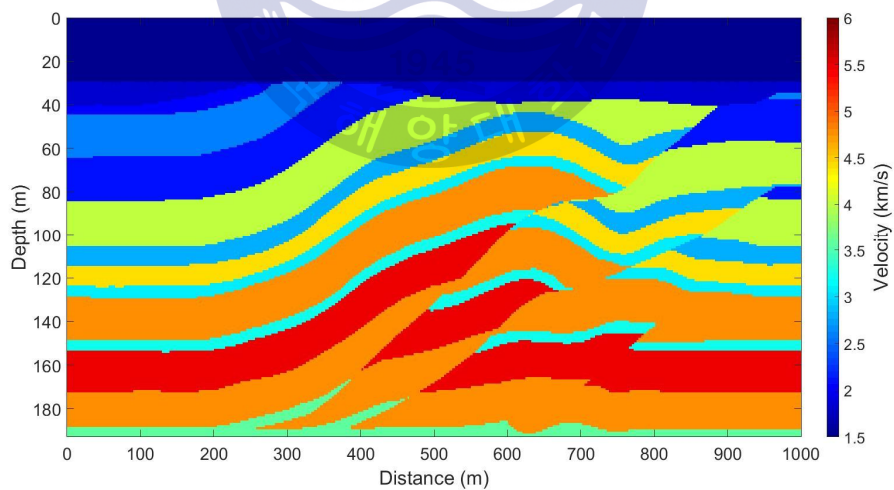


Fig. 22 SEG/EAGE overthrust velocity model

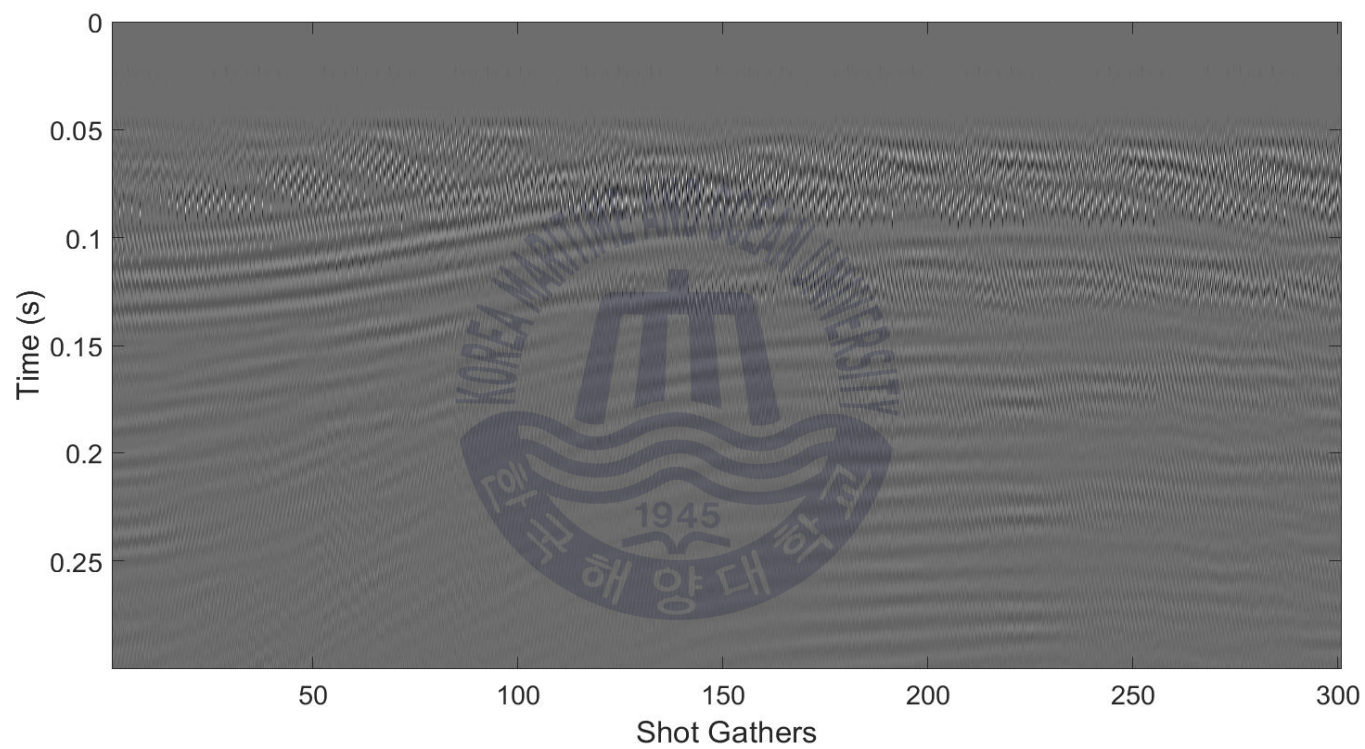


Fig. 23 Shot Gathers

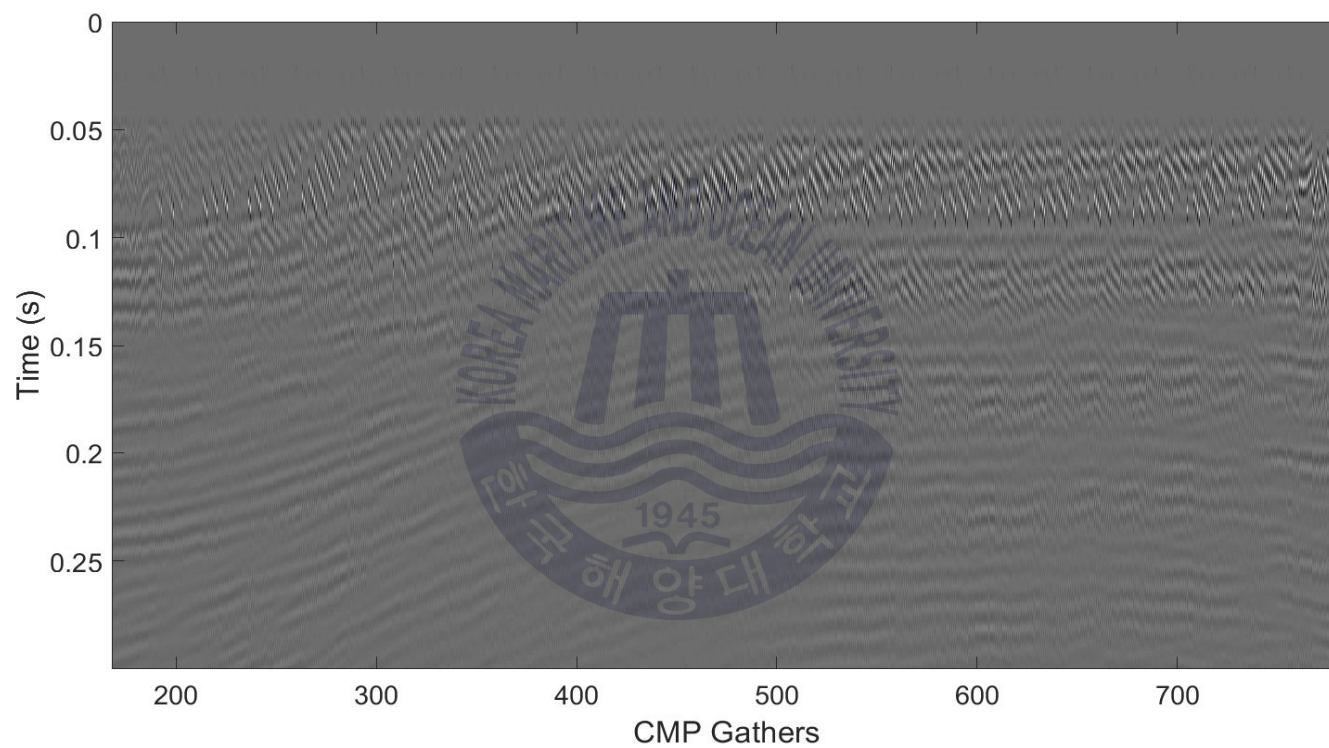


Fig. 24 Common Mid Point Gathers

공통송신원 모음자료를 중합 후 자료로 변환하기 위해 Marmousi-2 예제와 동일하게 Semblance 속도분석을 수행하지 않고 Fig. 25와 같은 실제 모델을 평활화한 모델에서 RMS 속도 및 주시정보를 도출하여 적용하였다. 평활화한 속도모델의 경우 단층의 형상이 나타나지 않고, 전체적인 속도 양상만을 알 수 있다. 해당 속도모델을 이용하여 Fig. 26과 같은 중합자료를 생성하였으며, 중합 전 구조보정인 위상-이동구조보정을 상 속도를 이용하여 적용하였다(Fig. 27). 중합 전 구조보정을 적용한 결과 전반적으로 낮은 속도를 가진 천부지층의 경우 지층의 경계가 잘 나타남을 확인할 수 있지만, 전체적으로 층상단층의 형상은 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 지층 하부에 존재하는 고속도 모델의 경우 경계가 잘 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 지층 하부의 고속도 층과 층상단층에서 반사되는 신호가 산란됨에 따라, 수신기에 기록되는 정보가 부족하여 나타나는 현상이다.

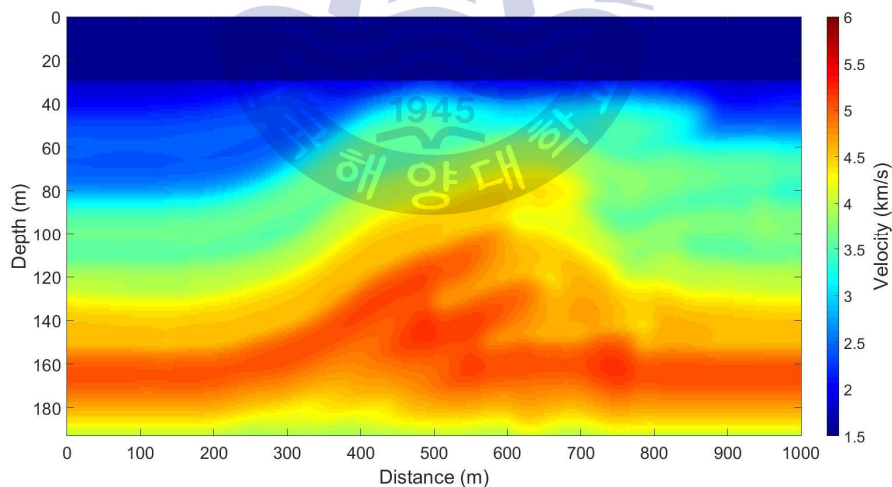


Fig. 25 Smoothing velocity model

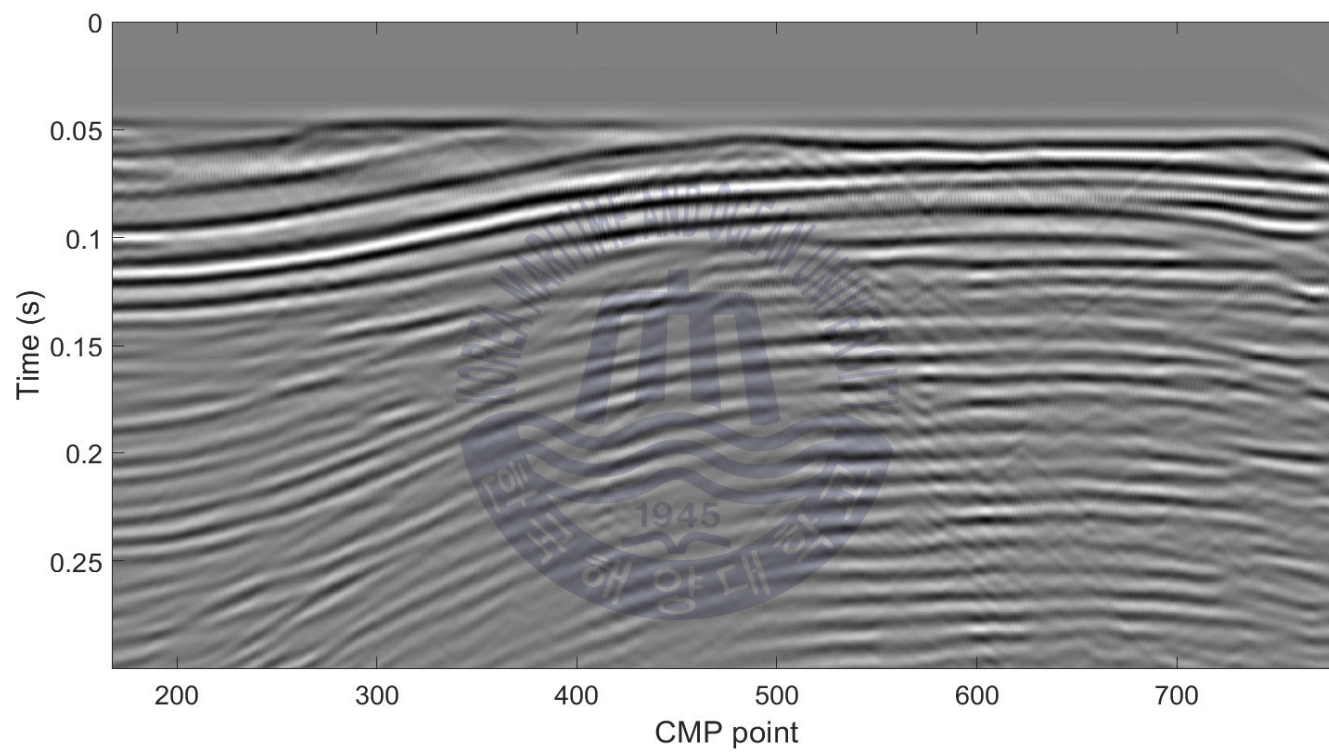


Fig. 26 Stack Section

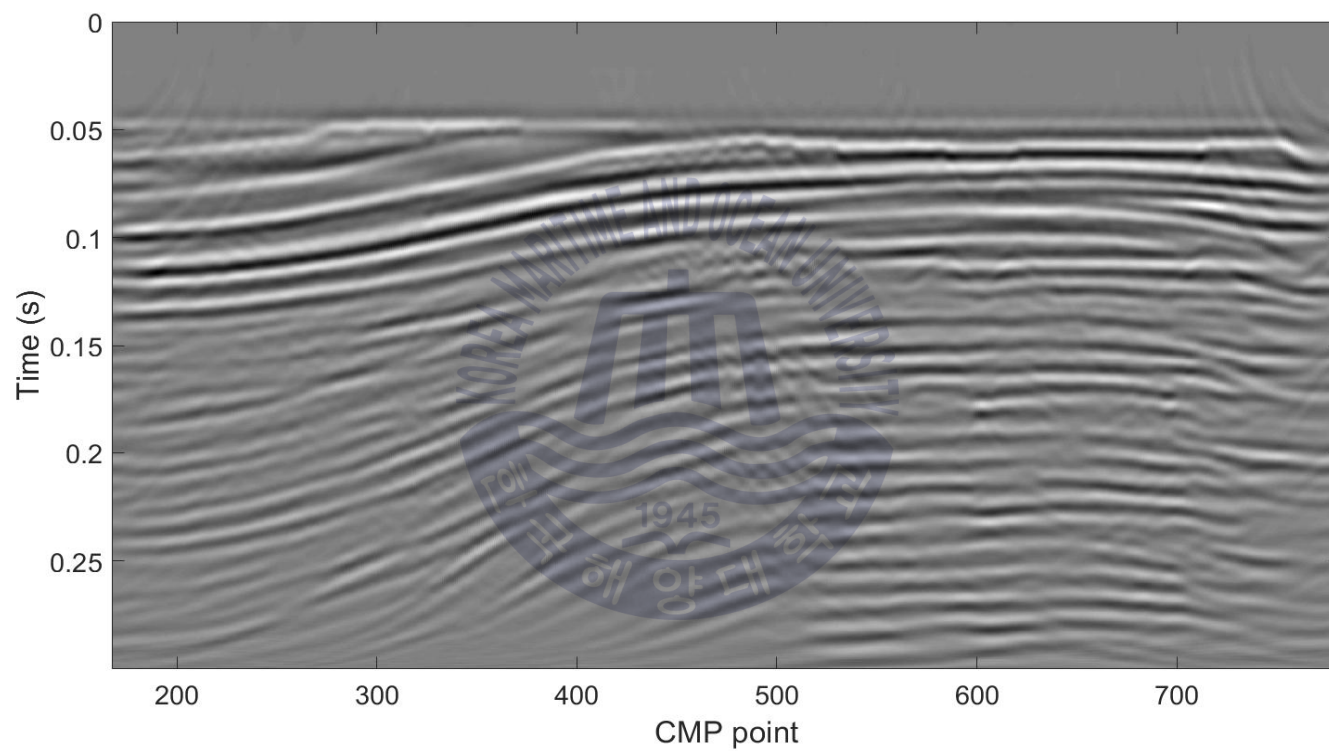
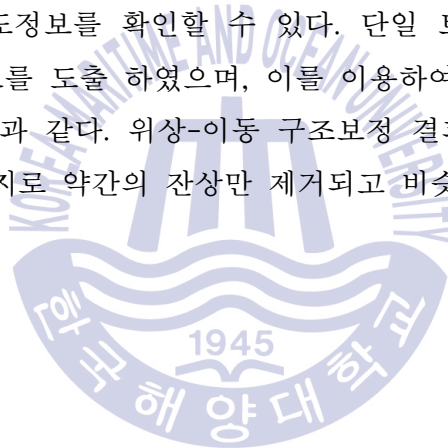


Fig. 27 Result of Phase-Shift Migration

평활화한 속도모델에서 도출된 RMS 정보를 통해 얻어진 중합 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였다. 역산 수행 시 초기속도 모델의 경우 Semblance 속도분석에서 사용하였던 평활화한 속도모델을 이용하였다. 음원의 경우 공통중간점 모음자료에서 직접파만을 이용하여 추정하였다. Fig. 28은 단일 트레이스 역산 결과를 나타내며, Fig. 29는 수평 400m, 700m 지점 깊이방향에 대한 물성 정보를 나타내었다. 역산 결과의 경우 Mamousi-2 모델과 마찬가지로 연속성과 전반적인 지층의 형상을 나타냄을 확인할 수 있다. 하지만, 층상 단층의 형상은 나타나지 않는 것을 확인할 수 있으며, 깊이방향에 대한 정보를 확인해봤을 때 속도의 형상이 깊이방향으로 이동되어 나타남을 확인할 수 있다. 위상-이동 구조보정 결과와 비교하였을 때 천부와 심부지층에 대한 대략적인 지층의 경계와 속도정보를 확인할 수 있다. 단일 트레이스 역산 결과에서 RMS 속도 및 주시정보를 도출 하였으며, 이를 이용하여 위상-이동 구조보정을 적용한 결과는 Fig. 30과 같다. 위상-이동 구조보정 결과는 평활화한 속도모델과 비교해보면 마찬가지로 약간의 잔상만 제거되고 비슷한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.



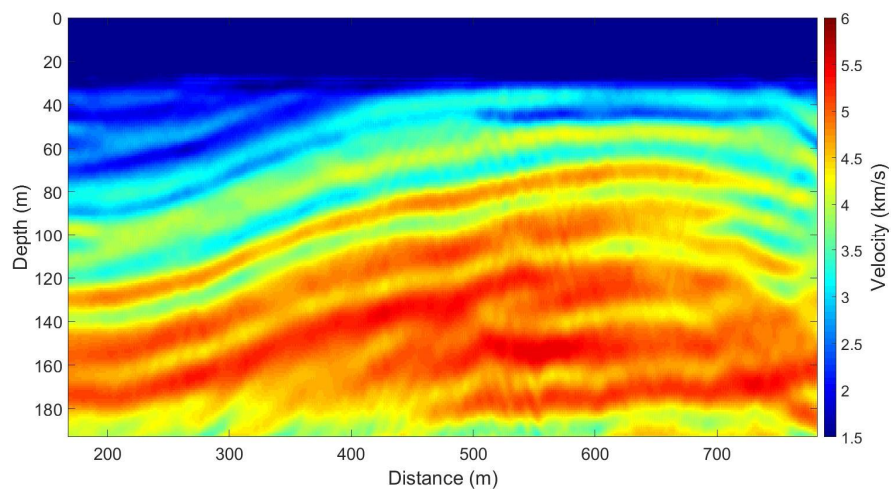


Fig. 28 Result of single trace inversion

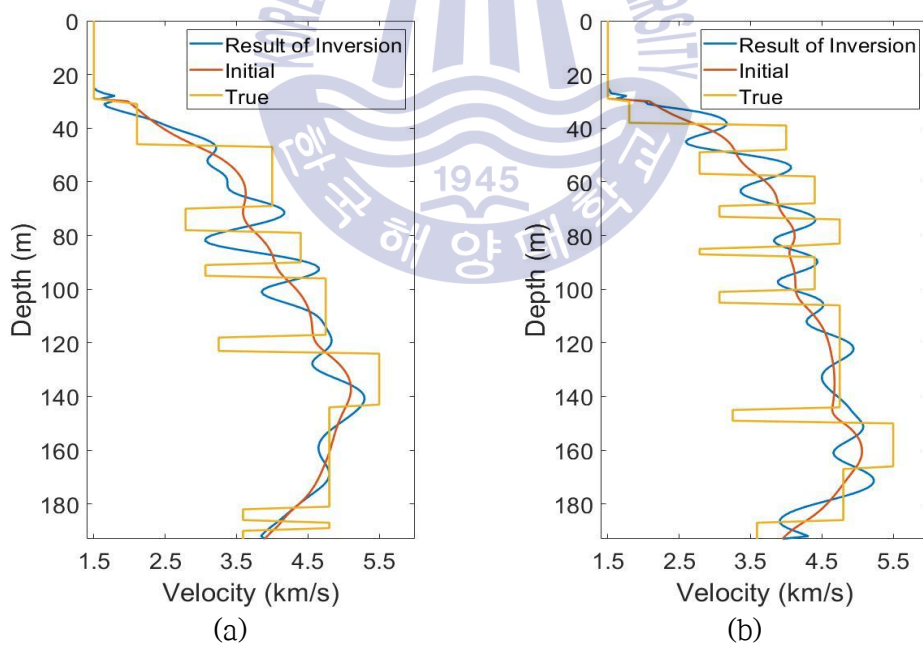


Fig. 29 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion

at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m

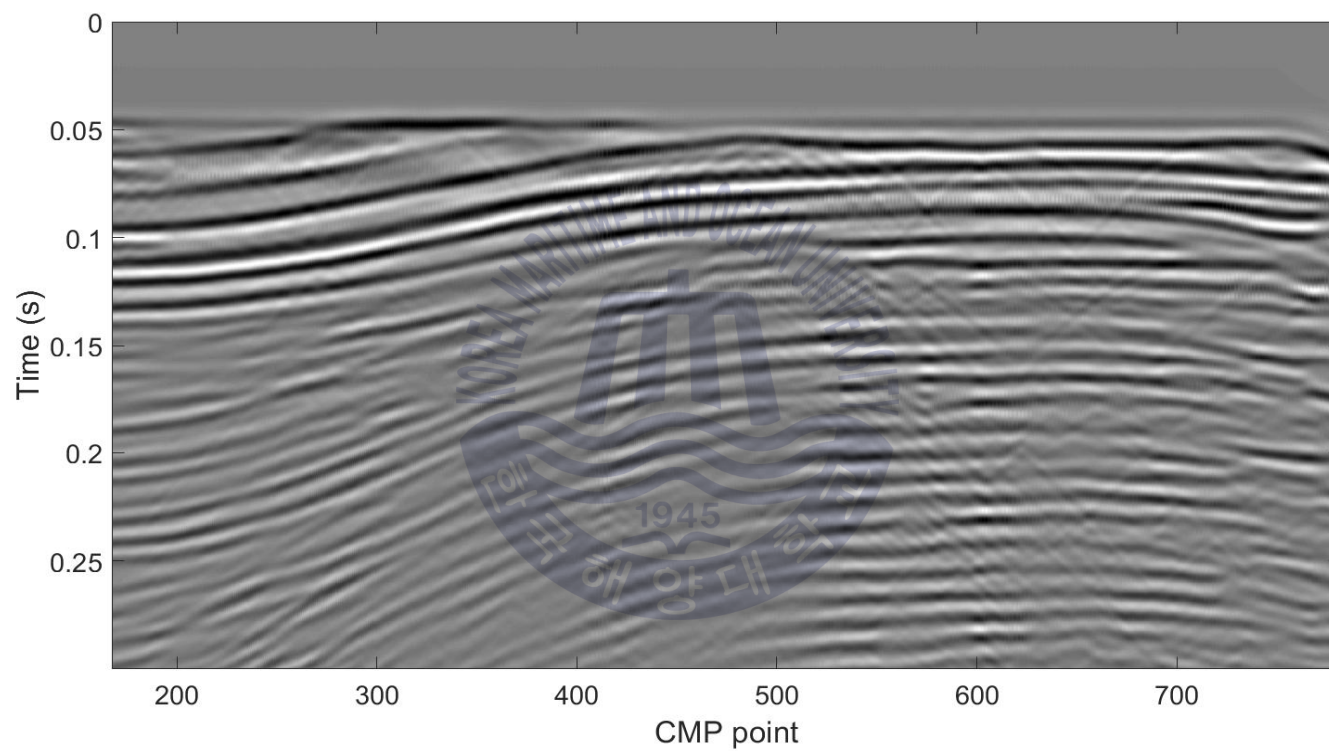


Fig. 30 Result of Phase-Shift Migration using result of single trace inversion

해당 SEG/EAGE 층상단층 모델에서도 단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보를 2차원 파형역산에 초기속도모델로서 이용하고자 하였다. 인공합성자료를 생성하기 위한 모델링 변수의 경우 Table 2와 동일하게 수행하였다. 해당 초기속도모델을 이용한 역산결과를 비교 분석을 수행하기 위해 선형증가모델을 초기속도모델로서 이용하여 추가적으로 2차원 파형역산을 수행하였다.

Marmousi-2 모델 예제와 동일하게 초기속도모델을 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 유형을 Type1이라 명칭하며, 선형증가 속도모델을 이용한 경우를 Type2로 명칭 하였다. Fig. 31과 Fig. 32는 초기속도 모델로서 단일 트레이스 역산결과를 이용한 역산결과와 선형증가 속도모델을 이용한 역산결과를 나타낸다. 보다 정밀한 비교를 위하여 수평 400m 지점 깊이방향에 대한 물성 정보와 수평 700m 지점의 물성 정보를 Fig. 33, Fig. 34로 나타내었다. 역산 결과 선형증가 속도모델을 이용하였을 경우 초기속도모델의 장파장성분이 부족한 한계로 인하여 역산이 잘 수행되지 않음을 알 수 있다. 전반적인 역산결과는 단일 트레이스 역산을 수행하였을 때 깊이방향으로 이동되었던 모델정보가 실제 속도 모델에 맞추어 잘 나타냄을 확인할 수 있다.

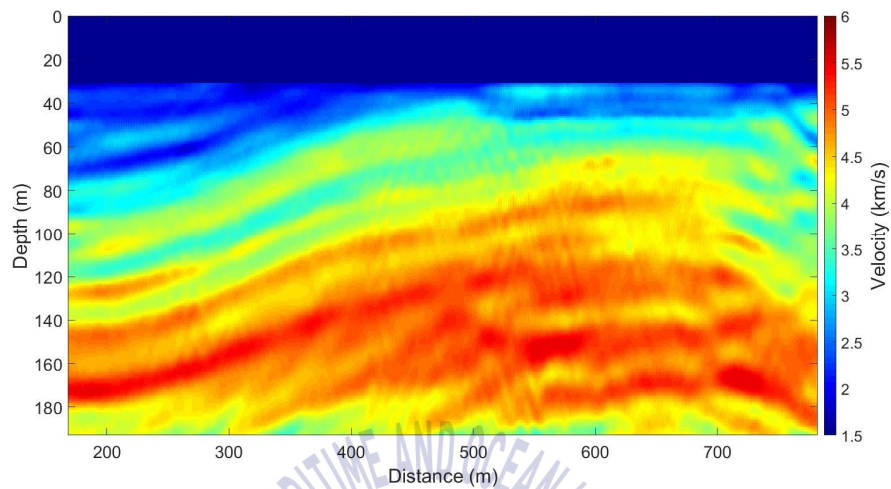


Fig. 31 Result of 2D inversion : Type1

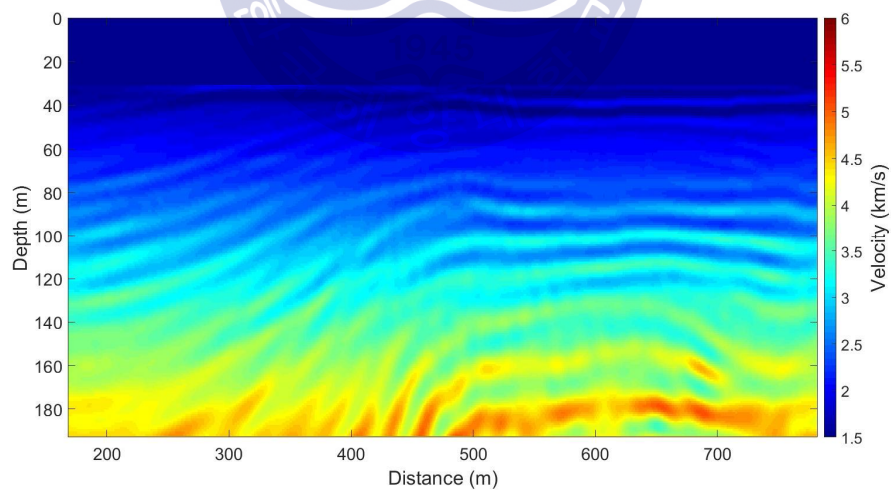


Fig. 32 Result of 2D inversion : Type2

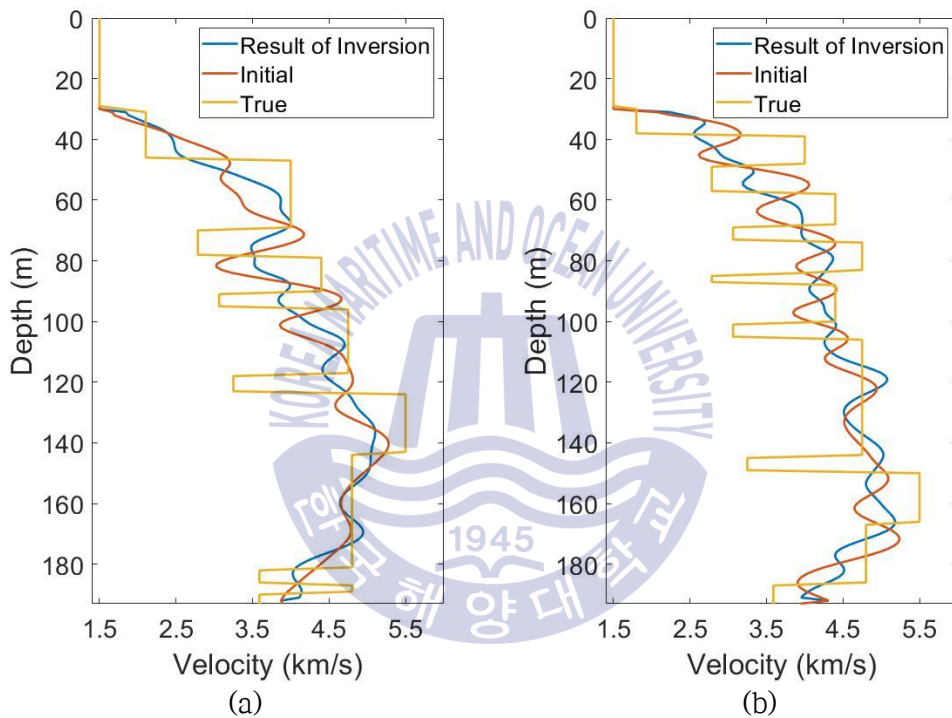


Fig. 33 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion

at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m : Type1

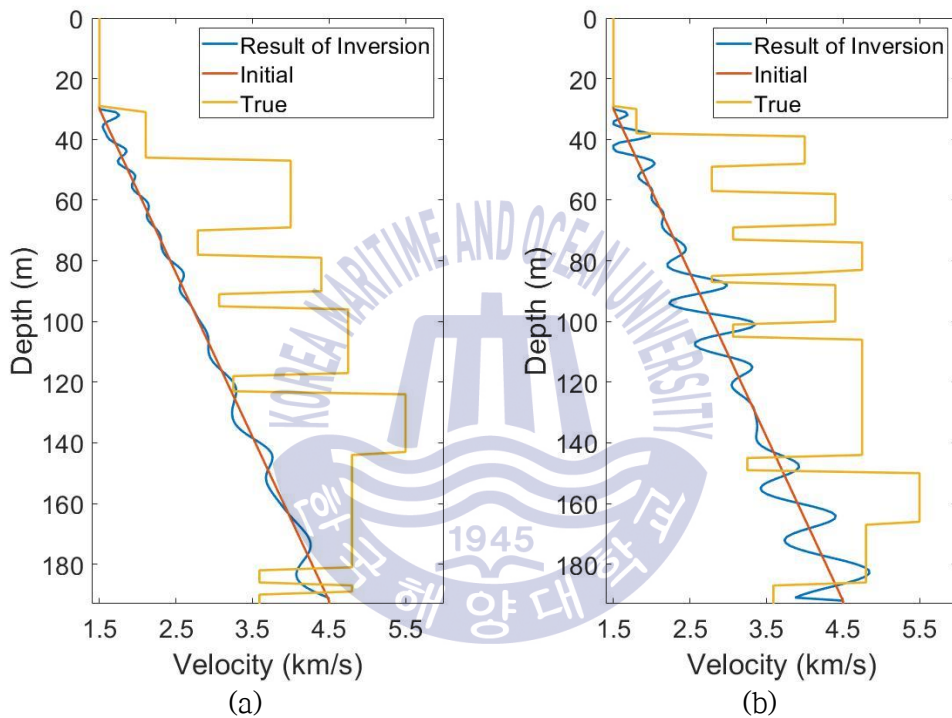


Fig. 34 Depth profiles of true, initial and inverted velocity by inversion
at a horizontal position of (a) 400m, (b) 700m : Type2

단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성 정보를 중합 전 구조보정인 역시간 구조보정에서 필요한 배경모델로서 이용하였다. 역시간 구조보정을 수행하기 위한 모델링 변수는 2차원 파형역산에서 수행한 변수와 동일하며, 속도모델을 단일 트레이스 역산 결과를 이용한 경우를 Type1, 선형증가 속도모델을 이용한 경우를 Type2로 명칭하여 수행하였다. Fig. 35과 Fig. 36은 역시간 구조보정 결과를 나타낸다. 역시간 구조보정의 결과는 수직방향으로 2회의 1차 미분을 적용하여 나타내었다. 구조보정 결과 단일 트레이스 역산결과를 이용한 천부 지층의 경계부분을 확인할 수 있지만, 선형증가 속도모델을 이용하였을 경우 경계층을 확인할 수 없는 것으로 보인다. 단일 트레이스 역산결과를 이용할 경우 단층의 형상과 단층 하부에 존재하는 고속도층 경계의 규명에 어려움이 있으며, 이는 소규모 탐사가 갖는 한계로 판단된다. 소규모 탐사의 경우 속도변화가 심하지 않은 지층에 적합한 탐사법으로서 층상단층과 같이 속도변화가 심한 영역에서의 단층을 규명하기에는 어려움이 있다.



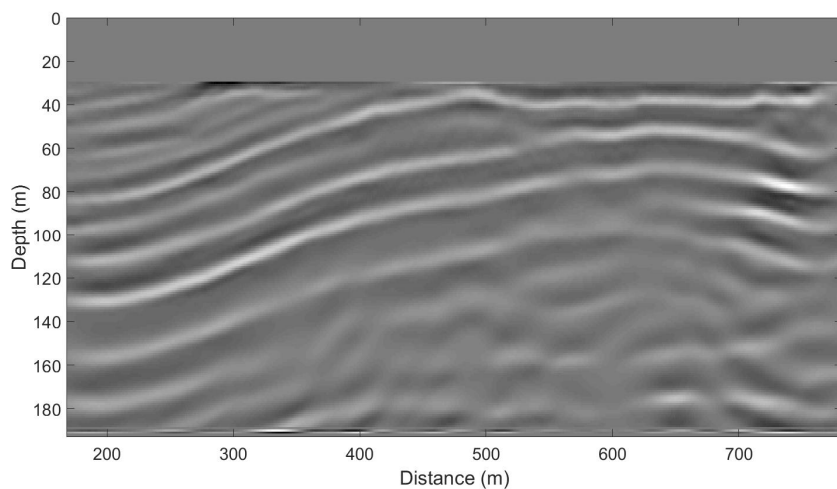


Fig. 35 Result of RTM : Type1

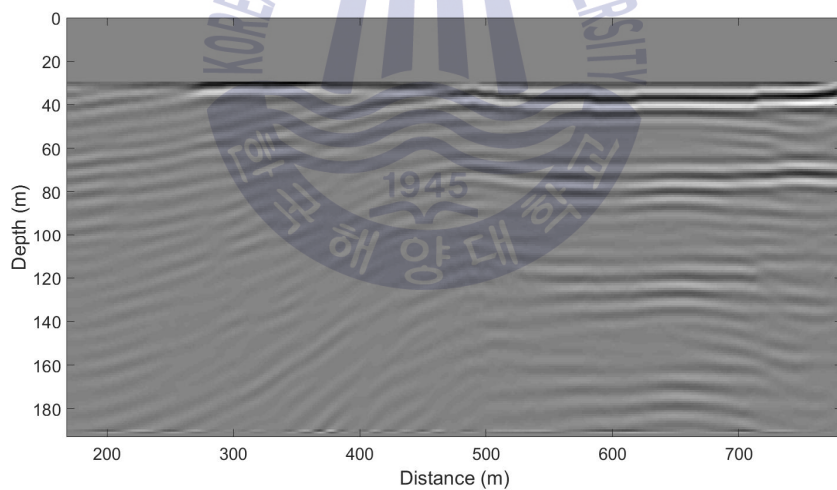


Fig. 36 Result of RTM : Type2

3.2 3차원 현장자료

제안된 기법을 이용할 경우 분석자의 속도분석 자료를 통해 생성된 중합 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하고, 이를 이용하여 취득한 지하지질구조 단면의 신뢰성과 추가적인 물성 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 인공합성자료를 통해 적용성을 검토하였으며, 동해에서 수행된 소규모 3차원 탐사자료를 자료처리를 통해 얻은 중합 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였다. Fig. 37는 동해에서 소규모 탐사를 통해 취득된 현장자료를 이용하여 생성된 중합 자료이다. 해당 중합 자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였으며, 역산에 사용되는 음원은 1차 반사파를 음원추정기법을 통해 음원 추정하여 사용하였고, 초기속도모델의 경우 선형증가 속도모델을 이용하였다.

Fig. 38(a)는 중합 자료를 이용한 단일 트레이스 역산 결과를 나타낸 것이다. 단일 트레이스 역산임에도 불구하고 횡단면에 대한 신호의 연속성이 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 38(a)에 그려진 붉은 네모를 강조한 영상인 Fig. 38(b)는 횡단면에 부분을 확대한 영상이다. 해당 그림을 확인해보면, 주변 지층의 속도보다 비교적 고속도층이 나타남을 확인할 수 있으며, 이에 대한 연속성이 나타남을 확인할 수 있다. 이처럼 현장에서 얻어진 탐사자료를 이용하여 얻어진 중합 자료를 이용한 단일 트레이스 역산이 잘 수행됨을 확인할 수 있다. 이를 이용한 RMS 속도와 주시 정보를 도출하여 역산을 수행한다면 공통중간점 하부에 대한 분석을 더욱 정확히 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 분석자에 따라 달라지는 속도분석 결과에 대한 영향을 최소화시켜 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 단일 트레이스 결과로 얻어진 물성 정보는 파형역산 및 역시간 구조보정의 초기속도모델로서 제공되어 보다 정확한 지층의 경계를 구분할 수 있을 것으로 사료된다.

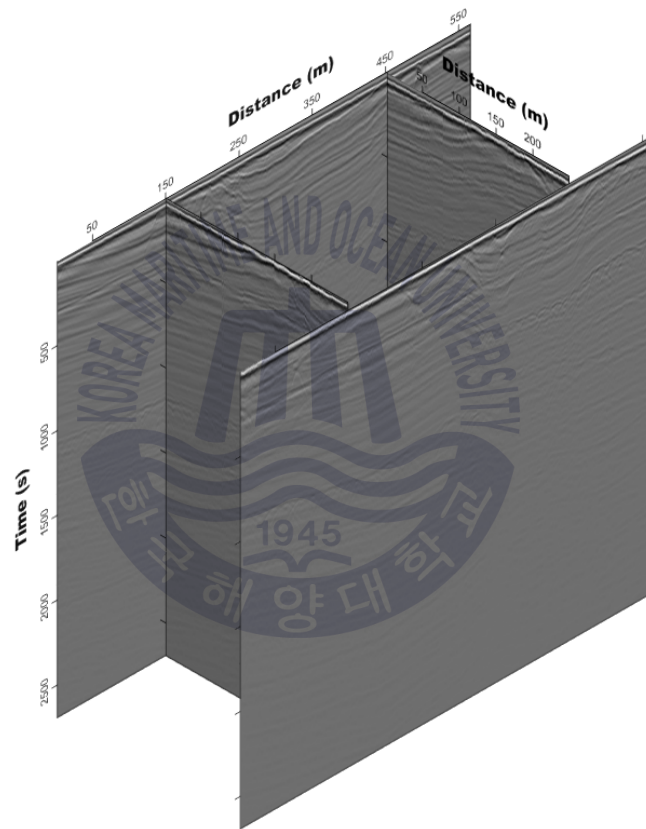
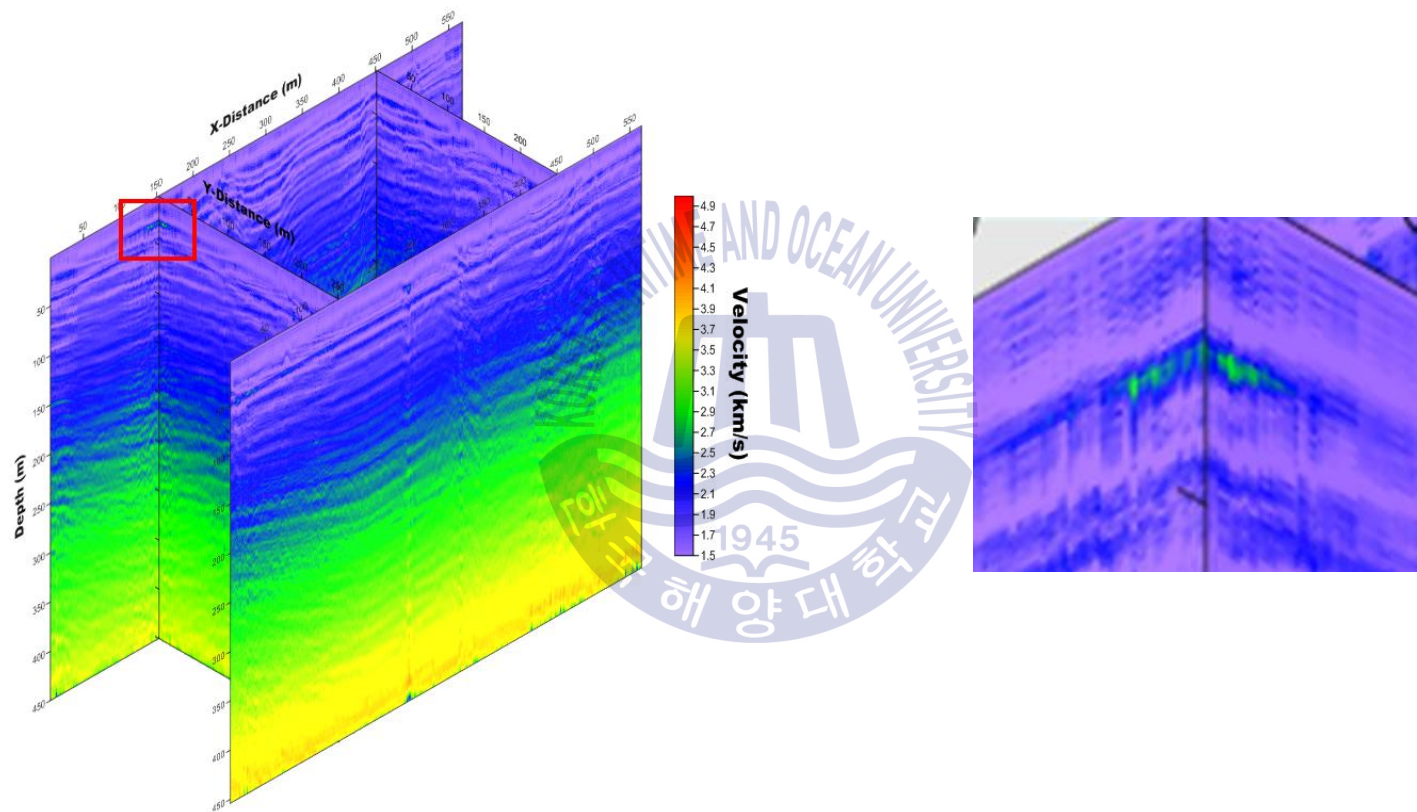


Fig. 37 Stack data : Cross section



(a)

(b)

Fig. 38 Result of inversion (a) Cross Section and (b) Zoom in Cross Section

제 5 장 결론

본 논문에서는 중합 후 자료에 단일 트레이스 역산을 적용하여 속도정보를 도출하였으며, 이러한 방법이 일반적인 자료처리과정의 속도분석 과정을 대체할 수 있을지에 대한 분석을 수행하였다. 일반적으로 수행되는 파형역산은 많은 계산 시간과 비용이 필요하지만 단일 트레이스 역산의 경우 빠르고 효율적으로 계산을 수행할 수 있었다. 제안된 기법은 전통적인 자료처리 과정에서 요구되는 속도분석에서 분석자의 주관적인 판단에 의한 영향을 줄일 수 있으며, 시간이 아닌 심도에 대한 물성정보를 직접 도출할 수 있는 장점이 있다. 이는 추가적인 자료처리과정을 위한 초기정보로 활용될 수 있으며, 보다 정확한 지층구조영상을 얻을 수 있게 한다.

중합 후 자료를 이용한 단일 트레이스 역산의 경우 수직, 수평적인 속도변화가 강한 구조에서 민감하고 다중채널 자료를 중합하여 얻어진 자료이기 때문에 수직, 수평적인 속도변화가 적고 소규모탐사를 가정한 수치예제를 이용하여 분석하였다. 속도변화가 적은 모델인 수정된 Marmousi-2 모델의 경우 지층의 속도변화에 따른 산란 및 분산효과가 미비하여 중합 시 공통중간점 하부 지층에 대한 파형특성의 변형이 크게 나타나지 않는 것을 확인하였다. 단일 트레이스 역산결과 매 공통중간점 하부지점에 대한 역산을 수행하였음에도 불구하고 지층경계부에 대한 연속성을 보였으며, 전체적인 물성변화의 양상이 실제 지층모델과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 단일 트레이스 역산을 통해 얻어진 물성정보에서 RMS 속도 및 주시정보를 도출하였으며, 이를 이용하여 수직시간차 보정을 수행하고 새로운 중합 후 자료를 생성하였다. 도출된 RMS 속도 및 주시정보를 이용하여 중합 후 구조보정을 수행하였을 때, 지하 구조에 물성변화에 따른 특성이 반영되어 전체적으로 약간의 잔상이 제거됨을 확인할 수 있었다. 보다 실제구조와 유사한 지층구조영상을 얻기 위해 단일 트레이스 역산결과를 다중채널 파형역산 및 역시간 구조보정에 적용하였다. 다중채널 파형역산의 경우 단일 트레이스 역산결과를 초기속도모델로서 적용하였을 때, 다중채널 자료의 특성이 반영되어 실제지층 구조의 물성정보와 유사한 결과 얻을 수 있

음을 확인할 수 있다. 선형증가속도모형을 이용하였을 때 전체적인 실제 지층에 대한 속도변화 경향을 찾아가지만 초기속도모델의 한계를 확인할 수 있었다. 다중채널 자료를 이용하여 역시간 구조보정을 수행한 결과 선형증가속도모델을 이용하였을 때, 초기속도모델의 한계로 인하여 지하 지층구조가 보다 얇게 평가되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 단일 트레이스 역산결과를 이용하였을 경우 보다 실제구조와 유사한 지층구조의 경계가 나타남을 확인할 수 있었다.

또한 본 논문에서는 수직, 수평적인 속도변화가 강한 구조를 가지는 SEG/EAGE 층상단층 모델에 제안된 알고리즘을 적용하고자 하였다. 해당 속도모델은 수직적으로 강한 속도변화를 가지며, 수평적으로는 층상단층에 따른 속도변화를 가지기 때문에, 제안된 알고리즘의 한계를 파악하고자 적용해보았다. Marmousi-2 모델 예제와 동일하게 소규모탐사를 가정하였으며, 제안된 속도정보 도출기법을 통해 얻어진 새로운 중합 후 자료를 이용하여 중합 후 구조보정을 수행하였다. 수행 결과, 기존 중합 후 자료를 이용하였을 때보다 천부 지층의 경계를 잘 찾아가는 것을 확인할 수 있지만, 하부 구조에 대한 한계를 나타내었다. 단일 트레이스 역산 결과 전반적인 지층의 구조를 파악할 수 있지만, 깊이 방향에 대한 정보를 확인 하였을 때 지층 경계 위치에 대한 정확한 분석이 잘 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 이는 속도변화가 강한 지층구조에서 나타나는 산란 및 분산효과로 중합 시 후기시간에 대한 파형변화가 이루어져 나타난 결과로서 판단된다. 단일 트레이스 역산결과를 이용한 다중채널 파형역산을 수행한 결과 지층 경계위치와 물성정보에 대하여 개선된 결과를 확인할 수 있지만, 강하게 나타나는 속도변화를 찾아가지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 속도변화에 대한 산란 및 분석효과를 고려하기 위한 충분한 수신기 정보가 부족한 것으로 판단된다. 단일 트레이스 역산결과를 초기속도모델로서 이용한 역시간 구조보정의 경우, 적은 수신기 정보에 비해 비교적 유사한 실제 지층 구조에 대한 영상을 획득할 수 있었다. 하지만, 층상단층에 따른 영상의 일그러짐만 확인할 수 있을 뿐 단층의 존재 여부를 파악하기에는 한계가 존재하였다.

해당 알고리즘의 현장자료에 대한 적용성을 검증하기 위해 동해에서 소규모 탐사를 통해 취득 및 처리된 중합자료를 이용하여 단일 트레이스 역산을 수행하였다. 단일 트레이스 역산 결과 전반적인 지층에 대한 연속성을 확인할 수 있었으며, 중간부에 위치한 고속도 정보를 확인할 수 있었다.

실제지층의 경우 수치예제에서 사용된 층상단층 모델과 같이 심도에 따른 급격한 속도변화는 비현실적이기 때문에 해당 알고리즘을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 개발된 알고리즘의 경우 향후 천해저에서 이루어지는 엔지니어링 목적의 소규모 탐사자료에 적용되어 기존 방법에 비해 빠르고 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 지층의 속도변화가 적고 완만한 경사가 예상되는 현장탐사 자료에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.



감사의 글

처음 연구실에 들어왔을 때부터 지금까지 많은 열정과 의지를 다지면서 연구실 생활을 하였습니다. 아직도 저를 돌아보면 부족함이 많은 저에게 이와 같은 성과를 허락해주신 것에 대해서 앞으로 더욱더 열심히 노력하고, 탐구하라는 뜻으로 받아들이겠습니다. 응용지구물리탐사 연구실에 들어와서 지금까지 좋은 분들을 만나게 되어 좀 더 자극받고, 노력하게 되었습니다. 학부과정, 그리고 학위 논문을 제출하는 이 시점에서 지난 대학 생활을 돌이켜 생각해봤을 때, 매사에 열정과 의지를 가지고 임할 수 있었던 이유는 부족함이 많은 저에게 물심양면으로 도움을 주신 분들 덕분입니다.

학위 논문을 마치면서 감사의 글을 기회삼아 도움을 주신 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다. 처음 뵈었을 때부터 지금까지 언제나 저를 배려해주시고, 제가 가진 호기심에 대해 공감해주신 정우근 교수님, 부족함이 많은 저에게 언제나 격려와 이해로 이끌어주셔서 감사합니다. 그리고 물리탐사라는 분야에서의 많은 가르침으로 저에게 해당 분야에서의 관심을 일깨워주신 신성렬 교수님께 감사합니다. 학부과정부터 지금까지 생각의 폭을 넓힐 수 있도록 도움을 주신 장원일 교수님께 감사합니다. 마지막으로 전공 분야에서 큰 가르침을 주신 임종세 교수님, 윤지호 교수님, 그리고 유경근 교수님께도 감사합니다.

연구실 생활을 하면서 많은 인연을 통해 지금의 저로 성장 할 수 있었습니다. 인연의 시작으로 지호 형과 보람이 누나, 모르는 것도 많고 제대로 하는 것이 없던 저를 이끌어주셔서 정말 고맙습니다. 대학원 진학 전 실험실에 선배가 없었던 저에게 많은 힘이 되어주었던 준석이 형과 채현이 형 언제나 저를 배려해주셨던 것과 학회에서의 추억은 잊지 않을 거 같아요. 고맙습니다. 그리고 말도 많고 장난기도 많은 저와 같이 학부 때부터 지금까지 옆에서 많은 도움을 주었던 대철이, 수윤이 형, 예리, 주미, 지유, 창표 정말 고맙습니다. 최근 실험실에 들어온 수민이 형, 앞으로 서로 부족한 부분을 채워주고 서로에게 동기부여가 되었으면 합니다. 잘 부탁드립니다. 이외에도 많은 도움을 주었던 선배님들과, 후배들 그리고 숙현이 누나와 민혜 누나에게 감사합니다. 마지막으로 어렸을 때부터 말 안 듣는 아들을 키우느라 고생하신 부모님과 언제나 든든한 누나 이외에 저에게 많은 도움을 주신 모든 분들께 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- 최연진 등, 2014. 탄성과 파형역산을 이용한 엔지니어링 목적의 단일채널 탄성과 탐사자료에서의 속도모델 도출. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 17(4), pp.231-241
- Aminzadeh F., Brac J. and Kunz T., 1997. *3-D salt and overthrust models*. The Society of Exploration Geophysicists. Tulsa
- Bae, H. et al., 2010. 2D acoustic-elastic coupled waveform inversion in the Laplace domain. *Geophysical Prospecting*, 58, pp.997-1010.
- Choi, Y., Shin, C., Min, D.-J., & Ha, T., 2005. Efficient calculation of the steepest descent direction for source independent seismic waveform inversion: An amplitude approach. *J. Comput. Phys.*, 208, pp.455-468.
- Choi, Y., Min, D. J., & Shin, C., 2008. Frequency-domain elastic full waveform inversion using the new pseudo-hessian matrix: Experience of elastic marmousi-2 synthetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, pp.2402-2415.
- Chung, W., Shin, C., & Pyun, S., 2010. 2D elastic waveform inversion in the Laplace domain. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, pp.3239-3249.
- Gauthier, O., Virieux, J., & Tarantola, A., 1986. Two dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: Numerical results. *GEOPHYSICS*, 51(7), pp.1387-1403.
- Gazdag, 1978, Wave-equation migration by phase shift, *GEOPHYSICS*, 43, pp.1342 - 1351.
- Ji, J., & Yun-Gyeong, C., 2010. 3D Seismic data processing methodology using public domain software system. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13(2), pp.159-168
- Kolb, P., Collino, F., & Lailly, P., 1986. Pre-stack inversion of a 1-D medium. *Proc. IEEE*, 74, pp.498-508.
- Kim, M., Choi, Y., Cha, Y. H., and Shin, C., 2009. 2-D frequency-domain waveform inversion of coupled acoustic elastic media with an irregular interface. *Pure Appl. Geophys.*, 166, pp.1967-1985.
- Kim, Y., Cho, Y. & Shin, C., 2013. Estimated source wavelet incorporated reverse-time

migration with a virtual source imaging condition. *Geophysical Prospecting*, 61, pp.314-333.

Lailly, P., 1983. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migration, Conference on inverse Scattering: Theory and Application. *Society for Industrial and Applied Mathematic*, pp.206-220.

Levenberg, K., 1944. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *The Quarterly of Applied Mathematics*, pp.164-168

Marquardt, W., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp.431-441

Martin, G., Wiley, R., & Marfurt, K. J., 2006. Marmousi2: An elastic upgrade for marmousi. *The leading edge*, 25, pp.156-166.

Min, D.-J., & Shin, C., 2006. Refraction tomography using a waveform-inversion back-propagation technique. *GEOPHYSICS*, 71, R21-R30.

Mora, P., 1987. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multioffset seismic data. *GEOPHYSICS*, 52, pp.1211-1228.

Pratt, R. G., Shin, C., & Hicks, G. J., 1998. Gauss-newton and full newton method in frequency-space seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International*, 133, pp.341-362.

Pyun, S., Shin, C., & Bednar, J. B., 2007. Comparison of waveform inversion, part3: amplitude approach. *Geophysical Prospecting*, 55, pp.477-485.

Saleh Ebrahimi, Amin Roshandel Kahoo, Yangkang Chen, & Milton Porsani, 2016 A high-resolution weighted AB semblance for dealing with amplitude-variation-with-offset phenomenon. *GEOPHYSICS*, 82(2), V85-V93.

Sheriff, R. E. & Geldart, L. P., 1995. *Exploration Seismology*. 2nd Ed. Cambridge University Press

Shin, C., & Cha, Y. H., 2008. Waveform inversion in the laplace domain. *Geophys. J. Int.*, 173, pp.922-931.

Shin, C., & Cha, Y. H., 2009. Waveform inversion in the laplace-fourier domain.

Geophys. J. Int., 177, pp.1067-1079.

Tarantola, A., 1984. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data. *GEOPHYSICS*, 49, pp.1259-1266.

Yilmaz, O., 1987. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists.

Yilmaz, Öz., Doherty, Stephen M., eds. 2000. Seismic data analysis. *United States: Society of Exploration Geophysicists*. pp.463 - 654.

